

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS
MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA
URBANA

RENAN SERRALVO CAMPOS

CONCRETO AUTOADENSÁVEL PRODUZIDO COM
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO:
PROPRIEDADES MECÂNICAS E REOLÓGICAS

CAMPINAS

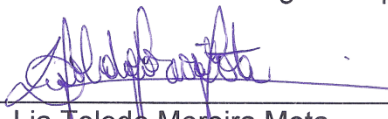
2017

RENAN SERRALVO CAMPOS

**CONCRETO AUTOADENSÁVEL PRODUZIDO COM
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO:
PROPRIEDADES MECÂNICAS E REOLÓGICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Orientador (a), até 16/12/2016: Prof. (a). Dr. (a) Mônica Pinto Barbosa.

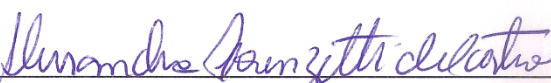
Dissertação defendida e aprovada em 15 de fevereiro de 2017 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota
Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Elizabeth Fátima de Souza
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro
Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Aos meus pais, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Finalmente o grande momento chegou! Após incontáveis horas dedicadas aos trabalhos experimentais, reuniões de orientação, leituras, reflexões, análises dos dados e a escrita (muita escrita), o trabalho encontra-se finalizado. A realização desta grande empreitada não se deve somente ao meu esforço e dedicação individuais, mas ao envolvimento e ao trabalho de muitos a quem eu expresso os meus agradecimentos.

Inicialmente, agradeço à Deus por ter iluminado o meu caminho e me dado forças em todos os dias da minha vida.

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão por todo o apoio, incentivo, carinho, compreensão e amor durante essa jornada.

Aos meus amigos, que sempre entenderam os momentos de ausência durante os últimos dois anos.

Aos docentes do programa, em especial aos do Grupo de Pesquisa em Tecnologia do Ambiente Construído – Prof^ª. Dr^ª. Lia Lorena Pimentel e Prof^ª. Dr^ª. Ana Elizabete P. G. A. Jacintho, por todas as discussões, contribuições e sugestões ao trabalho.

Aos colegas de turma, por todos os momentos de trocas de experiências e descontração.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil, Igor, Joventino e Wesley, por todo auxílio prestado no trabalho experimental.

Aos membros da banca examinadora, Prof^ª. Dr^ª Alessandra Lorenzetti de Castro e Prof^ª Dr^ª Elizabeth Fátima de Souza, por todas as valiosas contribuições ao trabalho.

Ao Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel (FEIS-UNESP) e sua equipe, por toda a disponibilidade e ensinamentos transmitidos sobre reometria e reologia, que muito contribuíram para o avanço deste trabalho.

Às empresas Holcim-Lafarge do Brasil, Grace Construction Products, Usina Recicladora de Hortolândia, Beneficiamento de Minérios Rio Claro e Tecnosil, pela doação de grande parte dos materiais utilizados nesta pesquisa.

À Associação Brasileira do Cimento Portland – ABCP, pela realização dos ensaios de lixiviação.

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

Por fim, mas jamais menos importante, um agradecimento muito especial a minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Mônica Pinto Barbosa, por acreditar e confiar em meu trabalho, me incentivar sempre, por toda a atenção, dedicação, amizade e carinho. Mônica, nesse momento as palavras me faltam para expressar a enorme gratidão que tenho por tudo!

À todos vocês, os meus mais profundos e sinceros agradecimentos! Muito obrigado!!!

“— La libertad, Sancho, es uno de los más preciosos dones que a los hombres dieron los cielos; con ella no pueden igualarse los tesoros que encierra la tierra ni el mar encubre; por la libertad así como por la honra se puede y debe aventurar la vida, y, por el contrario, el cautiverio es el mayor mal que puede venir a los hombres.”

Miguel de Cervantes (1547-1616)

RESUMO

O elevado consumo de recursos naturais e energia, associado ao expressivo montante de resíduos sólidos gerados pelas atividades de construção civil faz deste setor um dos maiores responsáveis por impactos ambientais. A reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição (RCD), na forma de agregados, é vista como uma alternativa para a diminuição destes impactos. Isto posto, o objetivo deste estudo foi investigar a influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas, mecânicas, índices físicos e no acabamento superficial de concretos autoadensáveis (CAA). Para isso, foram analisadas oito composições de CAA, sendo empregados o método de Repette-Melo e o modelo de Alfred, que tem por base o conceito de empacotamento de partículas, para a dosagem dos concretos. Assim, foram estabelecidos dois traços de referência, compostos apenas por agregados naturais. As demais misturas utilizaram agregados miúdos e/ou grãos reciclados em substituição aos agregados naturais, no teor de 20%, em massa. As propriedades do concreto fresco foram avaliadas no que diz respeito ao espalhamento, tempo de escoamento, habilidade passante e resistência à segregação. No estado endurecido foram determinadas as resistências à compressão e à tração por compressão diametral, o módulo de elasticidade estático, a absorção de água por imersão e por capilaridade, a massa específica e o índice de vazios. Neste estudo também foi realizada a caracterização reológica das pastas de cimento e das argamassas destinadas à produção dos CAA's, por meio de reometria rotacional. A caracterização reológica de pastas, argamassas e concretos é uma forma adequada para avaliar o comportamento destes compósitos no estado fresco, podendo prover informações úteis que auxiliarão no processo de dosagem e controle de qualidade. Outra propriedade avaliada foi o acabamento superficial dos concretos e argamassas e a possível correlação deste com os parâmetros reológicos. Através dos resultados obtidos foi possível constatar perda de fluidez nas argamassas e concretos que empregaram agregados reciclados. No que tange as propriedades mecânicas, foram observados comportamentos distintos nos concretos produzidos com agregados reciclados: àqueles dosados pelo método de Repette-Melo não apresentaram decréscimo significativo destas propriedades; enquanto que, os concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas exibiram grande redução nas propriedades mecânicas avaliadas. Os concretos produzidos com agregados reciclados ainda apresentaram aumento na absorção de água por imersão, no índice de vazios e na absorção capilar, quando comparados aos respectivos traços de referência. Foi possível observar boa correlação linear entre o acabamento superficial e a tensão de cisalhamento das argamassas. No caso dos concretos, o diâmetro de espalhamento foi a propriedade que melhor se correlacionou com a qualidade do acabamento superficial.

Palavras-chave: concreto autoadensável; agregados reciclados; reologia; empacotamento de partículas; acabamento superficial.

ABSTRACT

The high consumption of natural resources and energy, coupled with the significant amount of solid waste generated by the construction activities, makes this sector one of the most responsible for environmental impacts. The recycling of mineral fraction of construction and demolition wastes (CDW), in form of aggregates, is seen as an alternative to reduce these impacts. In this way, the aim of this study was to investigate the influence of recycled aggregates on the rheological, mechanical properties, physical indexes and surface finish of self-compacting concrete (SCC). For this, eight compositions of SCC were analyzed, using the Repette-Melo method and Alfred model, which is based on the concept of particle packing, for the mix design of concretes. Thus, two reference mixtures, composed only of natural aggregates, were established. The other mixtures used recycled fine and/or coarse aggregates instead of natural aggregates, at 20% by mass. The properties of fresh concrete were evaluated with respect to the flowability, viscosity (measure of the speed of flow), passing ability and segregation resistance. In hardened state, compressive strength, splitting tensile strength, static modulus of elasticity, water absorption by immersion and by capillarity, density and voids index were determined. In this study, rheological characterization of cement pastes and mortars destined to the production of SCC was also carried out using rotational rheometry. Rheological characterization of pastes, mortars and concretes is a suitable way to evaluate the behavior of these composites in fresh state, providing useful information that will aid in mix design process and quality control. Another property evaluated was the surface finish of concretes and mortars and the possible correlation of this with the rheological parameters. Through the results obtained it was possible to verify the loss of fluidity in mortars and concretes that used recycled aggregates. Regarding the mechanical properties, different behaviors were observed in concretes produced with recycled aggregates: those that were dosed by Repette-Melo method did not show a significant decrease of these properties; while the concretes dosed by the concept of particle packing exhibited a great reduction in mechanical properties. Concretes produced with recycled aggregates still showed an increase in water absorption by immersion, voids index and capillary absorption, when comparing to the respective reference mixtures. It was possible to observe a good linear correlation between surface finish and shear stress of mortars. In the case of concretes, the slump-flow was the property that best correlated with the quality of surface finish.

Keywords: self-compacting concrete; recycled aggregates; rheology; particle packing; surface finish.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do aparato para o ensaio de espalhamento do CAA.....	22
Figura 2 – Representação do funil V: (a) vista em planta; (b) vista frontal e (c) vista lateral.	24
Figura 3 – Representação da caixa L: (a) perspectiva; (b) vista lateral e (c) vista em planta.	26
Figura 4 – Representação esquemática da coluna de segregação.	28
Figura 5 – Representação do fluxo entre duas placas paralelas.....	31
Figura 6 – Curva de fluxo de um fluido Newtoniano.	34
Figura 7 - Curvas de fluxo dos fluidos: (1) Newtoniano; (2) pseudoplástico; (3) dilatante; (4) plástico ou de Bingham; (5) pseudoplástico com tensão de escoamento e (6) dilatante com tensão de escoamento.	35
Figura 8 – Curvas de fluxo de fluidos dependentes do tempo.	37
Figura 9 – Representação esquemática do cone de Marsh.....	40
Figura 10 – Reômetro R/S Rheometer utilizado: (a) sistema de cilindros coaxiais e (b) sistema Vane.	41
Figura 11 – Representação esquemática da “pele” de concreto.....	48
Figura 12 – Escalas de referência para avaliação do acabamento superficial: (a) proposta por Thompson (1969); (b) proposta pelo CIB (1973).	50
Figura 13 – Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes e (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.....	53
Figura 14 – Densidade de empacotamento máxima em função da relação entre os tamanhos de partículas para misturas bimodais de partículas minerais irregulares.....	54
Figura 15 – Representação esquemática da porosidade das partículas: (a) partícula densa; (b) partícula com porosidade fechada e (c) partícula com poros abertos.	55
Figura 16 – Representação do efeito parede: (a) acomodação das partículas caso não houvesse obstáculo; e, (b) camada com menor teor de agregados graúdos no entorno da “parede”.	56
Figura 17 – Representação esquemática do efeito da aglomeração das partículas gerando áreas de alta porosidade, indicadas pela letra P.	57
Figura 18 – Representação gráfica do modelo de empacotamento proposto por Furnas.....	58
Figura 19 – Representação do conceito de imagem de granulação.	59
Figura 20 – Representação gráfica do modelo de Andreasen, para diferentes valores de q.....	60

Figura 21 – Representação gráfica do modelo de empacotamento de Alfred.....	61
Figura 22 – Fluxograma das macroetapas da metodologia experimental.	68
Figura 23 – Representação esquemática do procedimento de dosagem dos concretos.	70
Figura 24 – Protocolo de ensaio reométrico: (a) pasta de cimento; (b) argamassa.	73
Figura 25 – Escalas para avaliação do acabamento superficial: (a) proposta pelo CIB (1973) e (b) adaptada por Silva e Stemberk (2013).....	75
Figura 26 – Representação esquemática das placas: (a) argamassa e (b) concreto.....	76
Figura 27 – Etapas do processamento digital de imagens.....	76
Figura 28 – Distribuição granulométrica do cimento.....	78
Figura 29 – Distribuição granulométrica da sílica ativa e do pó de quartzo.	79
Figura 30 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos naturais.....	80
Figura 31 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos naturais.....	81
Figura 32 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos reciclados.	82
Figura 33 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos reciclados.....	85
Figura 34 – Distribuição granulométrica discreta dos materiais empregados nos concretos dosados pelo (a) método de Repette-Melo e (b) com aplicação do conceito de empacotamento de partículas.	91
Figura 35 – Curvas de empacotamento do modelo de Alfred e do concreto CAA-EMP-REF.....	92
Figura 36 – Curvas de fluxo das pastas de cimento: (a) método de Repette-Melo e (b) empacotamento de partículas.	94
Figura 37 – Curvas de fluxo da argamassa ARG-REF.	97
Figura 38 – Curvas de fluxo das argamassas ARG-REF e ARG-AMR.	99
Figura 39 – Curvas de fluxo das argamassas ARG-EMP-REF e ARG-EMP-AMR.....	102
Figura 40 – Aspecto visual do espalhamento da argamassa ARG-REF: (a) aos 5 minutos; (b) aos 30 minutos; (c) aos 60 minutos;.....	102
Figura 41 – Espalhamento e tempo de escoamento da argamassa ARG-REF.	103
Figura 42 – Aspecto visual do espalhamento da argamassa ARG-AMR: com 0,40% de aditivo (a) aos 5 min, (b) aos 30 min e (c) aos 60 min; com 0,50% de aditivo (d) aos 5 min, (e) aos 30 min e (f) aos 60 min; com 0,60% de aditivo (g) aos 5 min, (h) aos 30 min e (i) aos 60 min.	104
Figura 43 – Aspecto visual do espalhamento da argamassa ARG-EMP-REF: com 1,30% de aditivo (a) aos 5 min, (b) aos 30 min e (c) aos 60 min; com 1,40% de aditivo (d) aos 5 min, (e) aos 30 min e (f) aos 60 min; com 1,50% de aditivo (g) aos 5 min, (h) aos 30 min e (i) aos 60 min.	105
Figura 44 – Aspecto visual do espalhamento da argamassa ARG-EMP-AMR: com 1,30% de aditivo (a) aos 5 min, (b) aos 30 min e (c) aos 60 min; com 1,40% de aditivo (d) aos 5	

min, (e) aos 30 min e (f) aos 60 min; com 1,50% de aditivo (g) aos 5 min, (h) aos 30 min e (i) aos 60 min.	106
Figura 45 – Correlação entre a tensão de escoamento e o espalhamento das argamassas.....	107
Figura 46 – Correlação entre a viscosidade plástica e o tempo de escoamento das argamassas.....	108
Figura 47 – Espalhamento dos concretos: (a) CAA-REF; (b) CAA-AGR; (c) CAA-AMR e (d) CAA-AGMR.	110
Figura 48 – Espalhamento dos concretos: (a) CAA-EMP-REF; (b) CAA- EMP-AGR; (c) CAA-EMP-AMR e (d) CAA- EMP-AGMR.....	110
Figura 49 – Habilidade passante dos concretos: (a) CAA-REF; (b) CAA-AGR; (c) CAA-AMR e (d) CAA-AGMR.....	111
Figura 50 – Habilidade passante dos concretos: (a) CAA-EMP-REF; (b) CAA- EMP-AGR; (c) CAA-EMP-AMR e (d) CAA- EMP-AGMR.....	112
Figura 51 – Evolução da resistência à compressão dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.....	115
Figura 52 – Evolução da resistência à compressão dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.	117
Figura 53 – Influência da relação água/cimento na resistência à compressão dos concretos.	118
Figura 54 – Evolução da resistência à tração dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.....	119
Figura 55 – Evolução da resistência à tração dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.	121
Figura 56 – Correlação entre resistência à compressão e resistência à tração dos concretos.	123
Figura 57 – Módulo de elasticidade dos concretos.....	124
Figura 58 – Correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos.	126
Figura 59 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos.	130
Figura 60 – Teste de Tukey para resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.	132
Figura 61 – Teste de Tukey para resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados base no conceito de empacotamento de partículas.	133
Figura 62 – Teste de Tukey para a resistência à tração aos 28 dias ds concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.	135

Figura 63 – Teste de Tukey para o módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.....	136
Figura 64 – Correlação entre os parâmetros reológicos e o acabamento superficial das argamassas.....	142
Figura 65 – Correlação entre os parâmetros reológicos e o acabamento superficial das argamassas, de acordo com o método de dosagem.	143
Figura 66 – Correlação entre a tensão de cisalhamento e o acabamento superficial das argamassas.....	144
Figura 67 – Correlação entre o diâmetro de espalhamento e a área de poros dos concretos.	145
Figura 68 – Correlação das propriedades no estado fresco e a área de poros dos concretos: (a) espalhamento; (b) tempo de escoamento t_{500} ; (c) tempo de escoamento no funil V e (d) habilidade passante.	146
Figura 69 – Custo dos concretos, em reais/m ³	147
Figura 70 – Custo dos concretos, em reais.m ³ /MPa.	148
Figura 71 – Placas da argamassa ARG-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	184
Figura 72 – Placas da argamassa ARG-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	185
Figura 73 – Placas da argamassa ARG-EMP-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.	186
Figura 74 – Placas da argamassa ARG-EMP-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.	187
Figura 75 – Tratamento de imagem das placas da argamassa ARG-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	188
Figura 76 – Tratamento de imagem das placas da argamassa ARG-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	189
Figura 77 – Tratamento de imagem das placas da argamassa ARG-EMP-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.	190
Figura 78 – Tratamento de imagem das placas da argamassa ARG-EMP-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.	191
Figura 79 – Placas do concreto CAA-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	192
Figura 80 – Placas do concreto CAA-AGR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	193
Figura 81 – Placas do concreto CAA-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	194

Figura 82 – Placas do concreto CAA-AGMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	195
Figura 83 – Placas do concreto CAA-EMP-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	196
Figura 84 – Placas do concreto CAA-EMP-AGR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	197
Figura 85 – Placas do concreto CAA-EMP-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	198
Figura 86 – Placas do concreto CAA-EMP-AGMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	199
Figura 87 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	200
Figura 88 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-AGR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	200
Figura 89 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	200
Figura 90 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-AGMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	200
Figura 91 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-EMP-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	200
Figura 92 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-EMP-AGR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	200
Figura 93 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-EMP-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	200
Figura 94 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-EMP-AGMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.....	200

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formas de disposição do RCD no solo.....	7
Tabela 2 – Existência e tipo de processamento do RCD.....	8
Tabela 3 - Composição dos RCD.....	11
Tabela 4 – Classes de espalhamento.....	22
Tabela 5 – Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação.....	23
Tabela 6 – Classes de viscosidade plástica aparente.	24
Tabela 7 – Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação.....	25
Tabela 8 – Classes de habilidade passante sob fluxo confinado.....	26
Tabela 9 – Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação.	27
Tabela 10 – Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação.	28
Tabela 11 – Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação.....	29
Tabela 12 – Efeitos dos materiais constituintes na reologia das argamassas.....	45
Tabela 13 – Ensaio de caracterização dos agregados.	67
Tabela 14 – Caracterização física dos agregados miúdos naturais.	79
Tabela 15 – Caracterização física da brita natural.....	80
Tabela 16 – Propriedades físicas dos agregados graúdos reciclados.	83
Tabela 17 – Concentração de metais no extrato lixiviado dos agregados graúdos reciclados.....	84
Tabela 18 – Classificação do agregado graúdo reciclado selecionado (AGR-HO).	85
Tabela 19 – Propriedades físicas dos agregados miúdos reciclados.....	86
Tabela 20 – Concentração de metais no extrato lixiviado dos agregados miúdos reciclados.....	86
Tabela 21 – Propriedades físicas do aditivo.	87
Tabela 22 – Dosagem da pasta de cimento oriunda dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.....	88
Tabela 23 – Dosagem das argamassas provenientes dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.....	89
Tabela 24 – Dosagem dos concretos pelo método de Repette-Melo.....	90
Tabela 25 – Dosagem dos concretos com aplicação do conceito de empacotamento de partículas.	93
Tabela 26 – Dosagem das argamassas oriundas dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.	93
Tabela 27 – Dosagem da pasta de cimento proveniente dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.	94

Tabela 28 – Parâmetros reológicos das pastas de cimento.....	95
Tabela 29 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-REF.....	98
Tabela 30 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-AMR.....	98
Tabela 31 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-REF.....	100
Tabela 32 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-AMR.....	101
Tabela 33 – Espalhamento e tempo de escoamento da argamassa ARG-AMR.....	104
Tabela 34 – Espalhamento e tempo de escoamento da argamassa ARG-EMP-REF....	105
Tabela 35 – Espalhamento e tempo de escoamento da argamassa ARG-EMP-REF....	106
Tabela 36 – Propriedades dos concretos no estado fresco.....	109
Tabela 37 – Propriedades dos concretos no estado fresco após 30 minutos da incorporação do aditivo superplastificante.....	113
Tabela 38 – Propriedades dos concretos no estado fresco após 60 minutos da incorporação do aditivo superplastificante.....	113
Tabela 39 – Resistência à compressão dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.....	114
Tabela 40 – Resistência à compressão dos concretos dosados com base no empacotamento de partículas.....	117
Tabela 41 – Resistência à tração dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.....	119
Tabela 42 – Resistência à tração dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.....	121
Tabela 43 – Módulo de elasticidade dos concretos.....	123
Tabela 44 – Absorção de água e índice de vazios dos concretos.....	127
Tabela 45 – Massa específica dos concretos.....	128
Tabela 46 – Absorção de água por capilaridade dos concretos.....	129
Tabela 47 – ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.....	131
Tabela 48 – ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.....	132
Tabela 49 – ANOVA para a resistência à tração aos 28 dias dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.....	134
Tabela 50 – ANOVA para a resistência à tração aos 28 dias dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.....	134
Tabela 51 – ANOVA para o módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.....	135
Tabela 52 – ANOVA para o módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.....	136

Tabela 53 – Áreas de poros superficiais das argamassas.....	138
Tabela 54 – Classificação do acabamento superficial das argamassas segundo a metodologia CIB.....	139
Tabela 55 – Áreas de poros superficiais dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.	140
Tabela 56 – Áreas de poros superficiais dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.	140
Tabela 57 – Classificação do acabamento superficial dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo segundo a metodologia CIB.	141
Tabela 58 – Classificação do acabamento superficial dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas segundo a metodologia CIB.	141
Tabela 59 – Custo das matérias-primas.	147
Tabela 60 – Propriedades reológicas da pasta de cimento dosada pelo método de Repette-Melo.....	167
Tabela 61 – Propriedades reológicas da pasta de cimento dosada com base no conceito de empacotamento de partículas.	167
Tabela 62 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-REF.....	168
Tabela 63 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-AMR, com 0,40% de aditivo.	168
Tabela 64 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-AMR, com 0,50% de aditivo.	168
Tabela 65 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-AMR, com 0,60% de aditivo.	169
Tabela 66 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-REF, com 1,30% de aditivo.....	169
Tabela 67 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-REF, com 1,40% de aditivo.....	169
Tabela 68 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-REF, com 1,50% de aditivo.....	170
Tabela 69 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-AMR, com 1,30% de aditivo.....	170
Tabela 70 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-AMR, com 1,40% de aditivo.....	170
Tabela 71 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-AMR, com 1,50% de aditivo.....	171
Tabela 72 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-REF – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	171

Tabela 73 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-AMR com 0,40% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	171
Tabela 74 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-AMR com 0,50% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	172
Tabela 75 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-AMR com 0,60% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	172
Tabela 76 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-REF com 1,30% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	172
Tabela 77 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-REF com 1,40% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	173
Tabela 78 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-REF com 1,50% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	173
Tabela 79 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-AMR com 1,30% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	173
Tabela 80 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-AMR com 1,40% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	174
Tabela 81 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-AMR com 1,50% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	174
Tabela 82 – Resistência à compressão axial – CAA-REF.	175
Tabela 83 – Resistência à compressão axial – CAA-AGR.	175
Tabela 84 – Resistência à compressão axial – CAA-AMR.	175
Tabela 85 – Resistência à compressão axial – CAA-AGMR.	176
Tabela 86 – Resistência à compressão axial – CAA-EMP-REF.	176
Tabela 87 – Resistência à compressão axial – CAA-EMP-AGR.	176
Tabela 88 – Resistência à compressão axial – CAA-EMP-AMR.	177
Tabela 89 – Resistência à compressão axial – CAA-EMP-AGMR.	177
Tabela 90 – Resistência à tração dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.	177
Tabela 91 – Resistência à tração dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.	178
Tabela 92 – Módulo de elasticidade estático dos concretos aos 28 dias.	178
Tabela 93 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-REF.	178
Tabela 94 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-AGR.	179
Tabela 95 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-AMR.	179
Tabela 96 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-AGMR. ...	179
Tabela 97 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-EMP-REF.	179

Tabela 98 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-EMP-AGR.	180
Tabela 99 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-EMP-AMR.	180
Tabela 100 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-EMP- AGMR.	180
Tabela 101 – Absorção de água por capilaridade – CAA-REF.	181
Tabela 102 – Absorção de água por capilaridade – CAA-AGR.....	181
Tabela 103 – Absorção de água por capilaridade – CAA-AMR.	181
Tabela 104 – Absorção de água por capilaridade – CAA-AGMR.....	182
Tabela 105 – Absorção de água por capilaridade – CAA-EMP-REF.	182
Tabela 106 – Absorção de água por capilaridade – CAA-EMP-AGR.....	182
Tabela 107 – Absorção de água por capilaridade – CAA-EMP-AMR.....	183
Tabela 108 – Absorção de água por capilaridade – CAA-EMP-AGMR.....	183

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.1	Objetivos	4
1.1.1	Objetivo geral	4
1.1.2	Objetivos específicos	4
1.2	Estrutura da dissertação	4
2	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	6
2.1	A problemática dos resíduos de construção e demolição	6
2.2	Reciclagem dos resíduos de construção e demolição	8
2.3	Aplicação dos agregados reciclados	10
3	CONCRETO AUTOADENSÁVEL	14
3.1	Histórico de desenvolvimento da técnica	14
3.2	Vantagens e limitações	15
3.3	Materiais constituintes	16
3.3.1	Cimento	16
3.3.2	Agregados	17
3.3.3	Adições minerais	18
3.3.4	Aditivos químicos	18
3.3.5	Água	19
3.4	Métodos de dosagem	19
3.4.1	Método de Okamura	19
3.4.2	Método de Gomes	20
3.4.3	Método de Tutikian & Dal Molin	20
3.4.4	Método de Repette-Melo	21
3.5	Procedimentos de ensaio no estado fresco	21
3.5.1	Habilidade de preenchimento	21
3.5.2	Viscosidade plástica aparente	23
3.5.3	Habilidade passante	25
3.5.4	Resistência à segregação	27
4	REOLOGIA	30
4.1	Conceituação	30
4.1.1	Conceitos fundamentais: viscosidade, tensão de cisalhamento e taxa de deformação.	31

4.1.2	Tensão de escoamento	32
4.2	Comportamento reológico dos fluidos	33
4.2.1	Fluidos Newtonianos	33
4.2.2	Fluidos não-Newtonianos	34
4.3	Reologia dos materiais cimentícios	38
4.3.1	Caracterização reológica dos materiais cimentícios	38
4.3.2	Reologia das pastas	41
4.3.3	Reologia das argamassas	44
4.3.4	Reologia dos concretos	46
4.4	A influência dos parâmetros reológicos no acabamento superficial dos compósitos cimentícios	48
5	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	52
5.1	Conceituação	52
5.2	Fatores que influenciam o empacotamento de partículas	53
5.2.1	Morfologia, porosidade e densidade das partículas	53
5.2.2	Efeito parede	55
5.2.3	Estado de dispersão das partículas	56
5.3	Modelos de empacotamento de partículas	57
5.4	Aplicabilidade do empacotamento de partículas em materiais cimentícios	61
6	PROGRAMA EXPERIMENTAL	66
6.1	Metodologia de caracterização dos materiais	66
6.1.1	Cimento	66
6.1.2	Adições minerais	66
6.1.3	Agregados naturais	66
6.1.4	Agregados reciclados	67
6.1.5	Aditivo químico	67
6.1.6	Água	68
6.2	Metodologia experimental	68
6.2.1	Dosagem	69
6.2.2	Métodos de ensaio e avaliação de desempenho	71
6.2.3	Análise de custos	77
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
7.1	Caracterização dos materiais	78

7.1.1	Cimento	78
7.1.2	Adições minerais	78
7.1.3	Agregados naturais	79
7.1.4	Agregados reciclados	81
7.1.5	Aditivo químico	87
7.2	Dosagem	88
7.2.1	Método de Repette-Melo	88
7.2.2	Empacotamento de partículas	90
7.3	Propriedades reológicas	94
7.3.1	Pastas de cimento	94
7.3.2	Argamassas	96
7.3.3	Concretos	109
7.4	Propriedades no estado endurecido	114
7.4.1	Resistência à compressão axial	114
7.4.2	Resistência à tração por compressão diametral	119
7.4.3	Módulo de elasticidade estático	123
7.4.4	Absorção de água por imersão e índice de vazios	126
7.4.5	Massa específica	128
7.4.6	Absorção de água por capilaridade	129
7.4.7	Análise estatística das propriedades mecânicas dos concretos	131
7.5	Acabamento superficial	138
7.5.1	Argamassas	138
7.5.2	Concretos	140
7.5.3	Correlações entre a qualidade do acabamento superficial e as propriedades reológicas	142
7.6	Análise de custos	146
8	CONCLUSÕES	150
8.1	Sugestões de trabalhos futuros	151
9	REFERÊNCIAS	153
10	APÊNDICE A	167
10.1	Propriedades reológicas	167
10.1.1	Pastas de cimento	167
10.1.2	Argamassas	168

10.2 Propriedades mecânicas e índices físicos	175
10.2.1 Resistência à compressão axial	175
10.2.2 Resistência à tração por compressão diametral	177
10.2.3 Módulo de elasticidade estático	178
10.2.4 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	178
10.2.5 Absorção de água por capilaridade	181
10.3 Acabamento superficial	184
10.3.1 Argamassas	184
10.3.2 Concretos	192

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria da construção civil é considerada o setor de atividades humanas que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, gerando consideráveis impactos ambientais. Além dos impactos relacionados ao consumo de matéria-prima e energia, há aqueles associados à geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Estima-se que entre 40-50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas sejam provenientes da construção civil (JOHN, 2000).

No que tange aos resíduos, Ângulo (2005) estima que sejam geradas anualmente mais de 68 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil. Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), referentes ao ano de 2015, indicam que foram coletadas 123.721 ton/dia de RCD no Brasil, o que corresponde, aproximadamente, a 45,2 milhões de ton/ano (ABRELPE, 2016). Desta maneira, verifica-se que a coleta desses resíduos ainda é deficiente, acarretando a disposição inadequada, o que pode vir a ocasionar a poluição dos solos e das águas, o comprometimento da paisagem urbana e riscos à saúde pública. Logo, a reciclagem dos RCD constitui uma medida urgente para a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável, uma vez que minimiza a extração de recursos naturais, diminui o volume de resíduos depositados em aterros, contribui para melhoria da paisagem e também para a geração de emprego e renda (ÂNGULO, 2005; MOREIRA, 2010).

O aproveitamento dos RCD pode ser feito mediante o emprego destes como fração graúda ou miúda na composição do concreto. Tradicionalmente, define-se concreto como o material composto formado pela mistura de aglomerante (cimento Portland, em geral), agregados - miúdo e graúdo - e água. A essa mistura podem ser incorporados aditivos químicos e adições minerais, podendo estas ser reativas ou não, a fim de que o concreto apresente desempenho e características melhoradas em relação ao concreto convencional.

O uso dos agregados provenientes de RCD para a produção de concretos convencionais já foi, e ainda é, objeto de estudo de inúmeras pesquisas, tanto no exterior quanto no Brasil. Os principais empecilhos apontados pela literatura para o

seu emprego são: a heterogeneidade e a variabilidade da composição e menor resistência mecânica, quando comparado com agregados naturais (ÂNGULO, 2005; MOREIRA, 2010; LOVATO *et al.*, 2012). Mesmo apresentando características diferenciadas em relação às dos agregados naturais, o uso dos agregados de RCD para a produção de concreto constitui uma importante atitude para o fomento de práticas sustentáveis na construção civil.

Deste modo, o que se pretende é a incorporação desses agregados reciclados na produção de um concreto especial. Os concretos especiais surgiram para suprir as necessidades do mercado por concretos mais resistentes e duráveis. Nesse sentido, foi desenvolvido no Japão, em 1986, o concreto autoadensável (CAA), fruto da necessidade de correção dos frequentes problemas de adensamento do concreto, causados, principalmente, pela complexidade das estruturas executadas e pela falta de mão de obra qualificada (OKAMURA; OUCHI, 1998).

O CAA pode ser entendido como o concreto que possui a capacidade de fluir no interior da forma, por ação exclusiva de seu peso próprio, sem a necessidade de qualquer adensamento mecânico, devendo possuir habilidade passante, sem apresentar bloqueio das partículas de agregado. Além disso, deve apresentar grande resistência à segregação e à exsudação, possibilitando, assim, o aumento da vida útil das estruturas (OKAMURA; OUCHI, 1998).

A dosagem do concreto, em especial do CAA, deve ser baseada em uma criteriosa seleção e combinação dos materiais constituintes, de modo a propiciar a racionalização de recursos e a obtenção do melhor custo-benefício.

A avaliação dos parâmetros reológicos do CAA se faz necessária, dado que este concreto apresenta elevada fluidez no estado fresco. A reologia é a ciência do escoamento e da deformação da matéria, a qual concerne o estudo das interações entre tensão de cisalhamento, taxa de deformação e tempo (BANFILL, 1994). A caracterização reológica pode englobar diferentes materiais, entre eles os cimentícios, como as pastas de cimento, argamassas e concretos que, quando no estado fresco, se comportam como fluidos.

Entende-se o concreto fresco como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em uma dispersão viscosa (pasta de cimento), sendo tal pasta composta por partículas (grãos de cimento) e um líquido (água), não se comportando, portanto, como um líquido puro (FERRARIS, 1999).

As propriedades reológicas do concreto fresco (viscosidade e tensão de escoamento) são dependentes das características da pasta de cimento e da argamassa, pois elas são responsáveis pela fluidez e coesão do concreto. Logo, o estudo reológico da pasta e da argamassa pode ser utilizado para a melhoria do processo de dosagem, uma vez que permitirá selecionar e otimizar os aditivos químicos e adições minerais que serão incorporados à mistura.

A análise reológica também pode ser utilizada como ferramenta de controle de qualidade. As falhas no controle reológico dos materiais cimentícios podem ocasionar diversos defeitos nas obras, uma vez que podem levar o operador a modificar a dosagem (adição de mais água, por exemplo), a fim de garantir a fluidez desejada. Tais falhas são inaceitáveis, dado que comprometem as propriedades mecânicas e durabilidade das estruturas executadas.

Além dos fatores acima elencados, recentemente, tem-se pesquisado a influência das propriedades reológicas na qualidade do acabamento superficial dos compósitos cimentícios. Contudo, esse assunto ainda carece de maiores investigações.

Outra vertente que apresenta grande potencial de aplicação para a melhoria dos processos de dosagem é o conceito de empacotamento de partículas. Diversas áreas da engenharia têm interesse pelos fenômenos de empacotamento de partículas, uma vez que grande parte dos materiais naturais ou industriais, são ou possuem partículas de diferentes formas e tamanhos (STROEVEN; STROEVEN, 1999).

O empacotamento de partículas refere-se à correta seleção e proporção dos materiais particulados, de modo que as partículas menores preencham os vazios deixados pelas partículas maiores, de maneira sucessiva (MCGEARY, 1961). Tal conceito é empregado na dosagem de concretos a fim de propiciar a melhoria do esqueleto granular, garantindo melhor trabalhabilidade e desempenho mecânico.

Por fim, diante da necessidade urgente do emprego de medidas sustentáveis para a produção de concretos, que podem ser conseguidas com o emprego de agregados provenientes de RCD, e também, a busca pela melhoria contínua dos procedimentos e métodos de dosagem, que podem ser obtidos por meio da aplicação dos conceitos de reologia e de empacotamento de partículas, justifica-se a importância e relevância do estudo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral dessa dissertação foi analisar a viabilidade da incorporação de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para a produção de concreto autoadensável.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- verificar como os agregados reciclados influenciam nas propriedades no estado fresco dos concretos e nos parâmetros reológicos das argamassas;
- avaliar a influência da substituição dos agregados naturais por reciclados nas propriedades mecânicas e nos índices físicos dos concretos;
- analisar a qualidade do acabamento superficial das argamassas e concretos e sua relação com as propriedades no estado fresco desses compósitos;
- verificar a viabilidade econômica do emprego de agregados reciclados em concretos autoadensáveis;

1.2 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está organizado em nove capítulos e estruturado conforme se expõe a seguir.

O Capítulo 1 é dedicado as considerações iniciais, onde é apresentada a contextualização sobre os assuntos abordados ao longo da dissertação, a justificativa do estudo desenvolvido e também os objetivos que se pretendem alcançar.

No Capítulo 2 são abordados os aspectos relativos aos resíduos de construção e demolição. Considerações acerca do desenvolvimento do concreto autoadensável, vantagens e desvantagens desta técnica, materiais constituintes, métodos de dosagem e procedimentos de ensaio são expostos no Capítulo 3.

O Capítulo 4 é dedicado a reologia, com especial ênfase ao estudo da reologia dos materiais cimentícios e da influência das propriedades reológicas na qualidade do acabamento superficial de concretos e argamassas. A aplicação do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos é tratada no Capítulo 5.

O Capítulo 6 é reservado ao programa experimental desenvolvido nesse trabalho, apresentando os materiais, equipamentos e métodos de ensaio utilizados para a consecução dos objetivos propostos.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos e discussões sobre os mesmos. As conclusões obtidas são exibidas no Capítulo 8, assim como as sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, o Capítulo 9 é destinado às referências citadas ao longo do trabalho.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 A problemática dos resíduos de construção e demolição

A indústria da construção civil é responsável por significativo impacto ambiental, pois além de expressiva consumidora de recursos naturais - estando estes cada vez mais escassos, é também grande geradora de resíduos, que muitas vezes não tem a correta destinação.

Considera-se resíduo de construção e demolição (RCD) todo e qualquer resíduo proveniente de atividades de construção, sejam estas novas construções, reformas, demolições, que envolvam atividades de obras de arte e limpeza de terrenos com presença de solo ou vegetação. Os RCD incluem diferentes materiais, tais como plásticos, isolantes, papel, materiais betuminosos, madeiras, metais, concretos, argamassas, blocos, tijolos, telhas, gesso, solo e outros (BRASIL, 2002; ÂNGULO, 2005; LOVATO *et al.*, 2012).

No que tange a geração de resíduos, Ângulo (2005) acredita que os RCD representem 50% dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), em massa. O mesmo autor ainda estima que sejam geradas 68,5 milhões de toneladas de RCD por ano no Brasil. Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2016) informam que foram coletadas, aproximadamente, 45,2 milhões de toneladas de RCD durante o ano de 2015. Salienta-se que a quantia total coletada não corresponde ao total gerado, uma vez que nem todos os municípios brasileiros contam com serviço público de coleta de RCD. Tal constatação encontra embasamento na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada em 2008, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que apontou que somente 71,62% dos municípios coletavam os resíduos de construção e demolição (IBGE, 2010). Lima (2013) afirma que o montante de RCD descartado clandestinamente ou de maneira inadequada é alto, contudo de difícil quantificação, uma vez que não existem dados concretos sobre este fenômeno.

No que concerne à disposição dada aos RCD pelos municípios, a PNSB (IBGE, 2010) constatou que esta se dava, em sua maioria (32,99%), em vazadouros, juntamente com os demais resíduos sólidos urbanos. Um percentual expressivo dos

RCD (10,97%) eram dispostos em aterros convencionais, também em conjunto com outros resíduos. Na Tabela 1 é apresentada a forma de disposição dada aos RCD, conforme dados da PNSB (IBGE, 2010). Cabe destacar que a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002) não permite a disposição dos RCD em aterros de resíduos sólidos urbanos, em áreas de "bota-fora", encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei. Verifica-se, portanto, que muitos municípios (aproximadamente 44%) ainda não atendiam plenamente ao disposto na referida resolução.

Tabela 1 – Formas de disposição do RCD no solo.

Forma de disposição do RCD	nº de Municípios	%
Em vazadouro, em conjunto com os demais resíduos	1330	32,99%
Em aterro convencional, em conjunto com os demais resíduos	442	10,97%
Em pátio de estocagem específico	176	4,37%
Em aterro público, específico	267	6,62%
Em aterro privado, específico	181	4,49%
Utilização após triagem, como material de aterro, pela prefeitura	503	12,48%
Utilização após triagem, como material de aterro, por terceiros	292	7,24%
Outras	1235	30,64%

Fonte: IBGE, 2010.

A disposição inadequada do RCD compromete a paisagem local e a circulação de pedestres e veículos, provoca o assoreamento de recursos hídricos, pode causar a contaminação do solo, contribui para o entupimento dos sistemas de drenagem urbana, acarretando em enchentes, além de servir de pretexto para o depósito irregular de outros resíduos não-inertes, propiciando o aparecimento e a multiplicação de vetores, causando grande risco à saúde pública (MOREIRA, 2010).

Outro ponto importante levantado pela PNSB (IBGE, 2010) refere-se à maneira como os municípios faziam o manejo dos RCD. Observa-se, por meio da análise dos dados constantes na Tabela 2, que apenas 1,41% dos municípios reaproveitavam os RCD na forma de agregados para a fabricação de elementos construtivos, indicando que ainda existe um longo caminho a ser percorrido para que a reciclagem dos RCD se torne uma constante nos municípios brasileiros. O

percentual de processamento dos RCD também é baixo (7,86%), indicando que a maior parte do resíduo coletado é disposta em aterros, conforme exemplificam os dados constantes na Tabela 2.

Tabela 2 – Existência e tipo de processamento do RCD.

Existência e tipo de Processamento do RCD	nº de Municípios	%
Sem serviço de coleta ou manejo de RCD	1533	27,31%
Com serviço de coleta, mas sem processamento do RCD	3639	64,83%
Triagem dos RCD	124	2,21%
Triagem e trituração dos RCD	14	0,25%
Triagem, trituração e separação granulométrica dos agregados reciclados	20	0,36%
Com processamento do RCD		
Reaproveitamento dos agregados reciclados na fabricação de elementos construtivos	79	1,41%
Outro	204	3,63%

Fonte: IBGE, 2010.

Isto posto, verifica-se que é urgente a necessidade de adoção de medidas que propiciem o aproveitamento dos RCD, sendo a reciclagem uma alternativa viável para a minimização do impacto ambiental causado por estes resíduos (LEITE, 2001; ÂNGULO, 2005; LOPES, 2005; MOREIRA, 2010).

2.2 Reciclagem dos resíduos de construção e demolição

Segundo a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), os resíduos provenientes das atividades de construção civil são classificados conforme se expõe:

- Classe A: são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- Classe B: são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;

- Classe C: são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;
- Classe D: são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos, materiais que contenham amianto e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

De acordo com Cabral (2013), a composição dos RCD é variável e depende da localização geográfica, da época do ano, do estágio da construção ou reforma, do tipo de estrutura e da técnica de demolição empregada, entre outros fatores. O mesmo autor ainda estima que, no Brasil, a composição média dos RCD seja 65% de origem mineral (rochas, concretos, materiais cerâmicos e argamassas, por exemplo), 13% de madeira, 8% plástico e que 14% correspondam a outros resíduos.

É importante salientar que os resíduos classificados como classe A, segundo a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), devem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, e somente em último caso, devem ser encaminhados para áreas de aterro específicas de resíduos de construção civil.

O beneficiamento dos RCD para uso como agregado consiste nas etapas de coleta, transporte, separação dos materiais indesejáveis, britagem, peneiramento e estocagem dos materiais até a sua utilização. Assim, tal processo de beneficiamento não difere muito do tratamento empregado para a produção de agregados naturais, sendo que muitos dos equipamentos utilizados se adequam em ambos os casos (LEITE, 2001; MOREIRA, 2010).

Inúmeros benefícios podem ser alcançados com a reciclagem dos RCD. No entanto, a falta de informações e estudo das propriedades desses materiais os levam a ser desperdiçados. Deste modo, é preciso ter disponibilidade de locais para instalação de sistemas de recepção, triagem e tratamento dos RCD, a fim de propiciar benefícios ambientais, econômicos e sociais à comunidade (MOREIRA, 2010). Zordan (1997) aponta que a reciclagem dos RCD vem a contribuir para a minimização do impacto causado ao meio ambiente do seguinte modo:

- a) conservação de matérias-primas não renováveis;
- b) redução do consumo de energia;

- c) redução de custos;
- d) minimização da poluição futura;
- e) desenvolvimento mais sustentável;
- f) melhoria da saúde e qualidade de vida da população.

Portanto, verifica-se que a reciclagem dos RCD constitui uma medida ambientalmente adequada, uma vez que minimiza o volume de resíduos dispostos em aterros ou em áreas irregulares, contribui para a melhoria da paisagem urbana, para a saúde pública, e ainda diminui a demanda por recursos naturais não renováveis.

2.3 Aplicação dos agregados reciclados

A utilização de agregados reciclados na produção de concreto não é uma ideia nova. Registros do uso de alvenaria britada na produção de concretos remontam a época do Império Romano. No entanto, o uso em grande escala dos agregados reciclados somente ocorreu após a Segunda Guerra Mundial, tendo em vista o grande volume de resíduos disponíveis, em virtude da destruição causada, e da necessidade de reconstrução dos centros urbanos (SCHULZ; HENDRICKS, 1992). Uma compilação sobre exemplos de obras executadas com concreto produzido com agregados reciclados pode ser encontrada no trabalho de Levy (2001).

No Brasil, a primeira pesquisa científica sobre o uso de agregados reciclados oriundos de RCD foi realizada no final dos anos 1980, sendo as primeiras usinas de reciclagem implantadas no início da década de 1990 (MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009). A relevância do tema foi confirmada por Pinto (1999), que mostrou que o RCD pode representar mais de 50% da massa dos resíduos sólidos municipais.

A aplicação dos agregados provenientes de RCD pode se dar, por exemplo, na produção de argamassas e concretos, blocos de vedação, enchimento de aterros, base e sub-base de pavimentos etc. (ÂNGULO, 2005; LOPES, 2005; GRUBBA, 2009; DE BRITO; SAIKIA, 2012; CABRAL, 2013). No tocante ao emprego

dos agregados reciclados de RCD na produção de concretos, o seu uso é viável, inclusive como agregado miúdo (ÂNGULO, 2005).

Há grande potencial de aplicação dos agregados reciclados de RCD na produção de materiais cimentícios. Contudo, ainda é preciso transpor algumas barreiras quando se pretende fazer uso destes agregados devido à heterogeneidade e variabilidade da sua composição, como também, à menor resistência mecânica, massa específica e unitária, e maior absorção de água quando comparados aos agregados naturais (LOVATO, 2007; DE BRITO; SAIKIA, 2012; CABRAL, 2013).

No que tange a heterogeneidade e variabilidade na composição dos agregados reciclados, esta pode estar relacionada a diversos fatores, tais como estágio da construção e/ou reforma, do método construtivo empregado, dos materiais de construção utilizados, do tipo de estrutura, da técnica de demolição, entre outros (DE BRITO; SAIKIA, 2012; CABRAL, 2013). A título de exemplo, as composições de RCD estudadas por alguns autores são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição dos RCD.

Composição	% (em massa)			
	Pinto (1986)	Zordan (1997)	Ângulo (2000)	Leite (2001)
Argamassa	64,0	37,4	28,0	28,3
Concreto	4,2	21,1	44,0	15,2
Rocha Natural	1,4	17,7	23,0	29,8
Materiais Cerâmicos	29,1	23,3	4,0	26,3
Outros	1,3	0,5	1,0	0,4

Fonte: Lopes, 2005.

No tocante a resistência mecânica dos agregados reciclados, esta é consequência direta da maior porosidade apresentada por estes agregados, o que também se reflete em maior capacidade de absorção de água. A maior porosidade dos agregados reciclados está relacionada, em geral, com a argamassa aderida nos agregados naturais e também com a fração cerâmica que os compõe (DE BRITO; SAIKIA, 2012).

Apesar das propriedades dos agregados poderem ser estudadas separadamente, aquelas importantes para a tecnologia do concreto estão inter-relacionadas e podem assim ser agrupadas (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016):

- características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade;
- características dependentes das condições prévias de exposição e das condições de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
- características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

Ainda, segundo os mesmos autores, em termos de relação com as propriedades do concreto, as propriedades dos agregados podem assim ser agrupadas:

- influenciadoras do estado fresco: porosidade ou massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial;
- influenciadoras do estado endurecido: porosidade, composição mineralógica e outras propriedades dependentes destas.

Outro fator que merece destaque quando se vai fazer uso de agregados reciclados é a possibilidade destes estarem contaminados por metais pesados. Estudos realizados por Townsend *et al.* (2004) encontraram altos níveis de metais pesados em agregados oriundos de RCD. Ainda segundo os mesmos autores, a contaminação dos agregados reciclados por metais pesados pode se dar de três modos: através do solo onde ficam dispostas as pilhas de resíduos; por pequenas frações de materiais perigosos contidos nos resíduos; e pela lixiviação dos materiais perigosos que estão misturados aos resíduos.

Van der Sloot (1998) ressalta a importância de compreender o comportamento de lixiviação dos resíduos, o que possibilitará uma avaliação adequada para sua utilização em materiais de construção, tratamento e reciclagem, eliminação dos resíduos e eventual remediação de áreas contaminadas.

No Brasil, a avaliação da lixiviação de metais pesados em resíduos de construção e demolição não é uma prática comum. Em trabalho realizado por Schaefer, Rocha e Cheriaf (2007), foram detectados metais pesados (arsênio, cádmio, cobre, cromo, manganês, níquel, selênio e zinco) em todas as amostras de agregados miúdos reciclados analisadas. A concentração desses metais foi inferior aos limites prescritos pela NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), contudo, quando os resultados são comparados com os limites da Diretiva Europeia 98/83/EC, os

autores verificaram que todos os valores obtidos são superiores aos recomendados. Deste modo, eles sugerem que há necessidade de incorporar a avaliação da lixiviação de metais pesados como um parâmetro de controle de qualidade dos agregados reciclados.

Lima e Cabral (2013) verificaram a presença de alguns metais pesados nos agregados reciclados produzidos na cidade de Fortaleza, no entanto, a concentração destes metais no extrato lixiviado não ultrapassou os limites preconizados pela NBR 10004:2004 (ABNT, 2004). Na avaliação do extrato solubilizado, entretanto, os autores observaram que parâmetros como alumínio, cádmio, chumbo, cromo e sulfato estavam acima do indicado pela respectiva norma. Deste modo, os autores ressaltam que, devido à possibilidade de contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, é necessário que hajam ensaios sistemáticos dos agregados reciclados, a fim de garantir o uso seguro em relação ao potencial risco ao meio ambiente.

Por fim, é evidente que os agregados apresentam importante papel no desempenho dos materiais cimentícios e, apesar das propriedades dos agregados reciclados de RCD diferirem das dos agregados naturais, salienta-se que seu uso é viável, tendo em vista os benefícios ambiental, econômico e social envolvidos. Sendo assim, é preciso um estudo sistemático e contínuo da influência dos agregados reciclados nas propriedades do concreto, a fim de que se possa garantir a qualidade, resistência e durabilidade dos concretos produzidos com agregados provenientes de RCD.

3 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

3.1 Histórico de desenvolvimento da técnica

Os primeiros estudos sobre o concreto autoadensável (CAA) datam do início da década de 1980, e foram conduzidos pelo professor Hajime Okamura, da *University of Tokyo*, em Tóquio, Japão. Estas investigações foram iniciadas para sanar os recorrentes problemas de adensamento do concreto, dada à complexidade das estruturas executadas, somada à falta de mão de obra qualificada para a execução de elementos estruturais. Tais fatos acabavam por comprometer a qualidade e durabilidade das estruturas de concreto (OKAMURA; OUCHI, 1998).

Deste modo, foi preciso desenvolver um concreto que dispensasse o processo de adensamento. A alternativa proposta foi um concreto com grande fluidez, que também apresentasse boa resistência à segregação, à exsudação e níveis adequados de resistência mecânica. O advento dos aditivos superplastificantes, em especial os de terceira geração, tornou possível a elaboração de um concreto com tais características (NUNES, 2001).

Define-se CAA como o concreto fluido capaz de mover-se no interior das fôrmas por ação exclusiva do próprio peso, sem a necessidade de qualquer adensamento ou vibração externos, devendo apresentar alta resistência à segregação e à exsudação e, ainda, ter habilidade para passar pelos obstáculos (armaduras, dutos e insertos) sem apresentar bloqueio das partículas de agregado (OKAMURA; OUCHI, 1998; ACI, 2007; ABNT, 2010a).

Para ser caracterizado como um concreto autoadensável, o concreto deve apresentar essencialmente três propriedades, as quais não competem ao concreto convencional (OKAMURA; OUCHI, 1998):

- fluidez ou habilidade de preenchimento: é a capacidade de fluir por toda a fôrma, preenchendo todos os espaços vazios e se autocompactando, mantendo-se homogêneo;
- habilidade passante: diz respeito ao escoamento por entre os obstáculos, as barras de armaduras, por exemplo, sem apresentar bloqueio das partículas de agregado;

- resistência à segregação ou estabilidade: está relacionada com a capacidade de se manter coeso, durante as etapas de mistura, transporte e lançamento.

3.2 Vantagens e limitações

Devido às características intrínsecas do material, a aplicação do CAA é de especial interesse em locais onde há dificuldade de se processar o adensamento. Deste modo, seu uso é adequado em elementos de formas complexas, de dimensões reduzidas e também que apresentam alta densidade de armadura. Sua aplicação é viável em obras muito grandes, uma vez que aumenta a velocidade de construção e também pode ser utilizado em obras de reforço e recuperação de estruturas (OKAMURA; OUCHI, 1998; NUNES, 2001; OKAMURA; OUCHI, 2003; MELO, 2005; TUTIKIAN, 2007).

O uso crescente do CAA se deve ao fato das inúmeras vantagens apresentadas por este material, conforme bem ilustra a literatura especializada (OKAMURA; OUCHI, 1998; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; DACZKO, 2012):

- a) aceleração da construção;
- b) redução da mão de obra no canteiro de obras;
- c) estruturas mais duráveis e com melhor acabamento superficial;
- d) maior liberdade de formas e dimensões, permitindo a concretagem de seções bastante reduzidas;
- e) eliminação do adensamento mecânico e respectivos equipamentos;
- f) não geração dos ruídos provocados pela vibração;
- g) ganho ambiental por empregar resíduos industriais (adições) no processo de produção;
- h) melhoria nas condições laborais e aumento da segurança no canteiro de obras, por diminuição dos ruídos, do número de equipamentos e de trabalhadores envolvidos nas operações de lançamento do concreto;
- i) redução do custo global do concreto e/ou da estrutura.

Dentre as desvantagens, merece destaque o fato de que o CAA necessita de maior controle tecnológico para sua produção e também no que diz respeito à cura, uma vez que este material emprega grande proporção de finos, favorecendo, assim, a fissuração e a retração no momento da pega e endurecimento (KLEIN, 2008). Outra desvantagem encontrada é o elevado custo dos aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade empregados na confecção do CAA.

3.3 Materiais constituintes

Além dos quatro constituintes básicos do concreto convencional, ou seja, cimento Portland, agregados – miúdo e graúdo – e água, o CAA demanda o uso de aditivos superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade e também de adições minerais, tais como fílers, cinza volante, sílica ativa, entre outras. A seguir são apresentadas considerações sucintas sobre os materiais constituintes do CAA.

3.3.1 Cimento

Todos os tipos de cimento Portland podem ser utilizados na confecção do CAA, desde que atendam às prescrições normativas locais. Deste modo, a escolha do tipo de cimento vai ser influenciada pelas exigências específicas de aplicação do CAA (KLEIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

As principais características do cimento que devem ser avaliadas para a produção do CAA são a finura e a capacidade de adsorver o aditivo superplastificante. No que diz respeito à finura, Nunes (2001) afirma que quanto maior a finura do cimento, maior é a viscosidade e menor é a tensão de escoamento, devido ao aumento da quantidade de partículas em contato com a água, diminuindo a distância e aumentando a frequência de colisão entre elas.

O consumo de cimento em composições de CAA varia de 200 a 450 kg/m³, dependendo do tipo de adições (reativas ou inertes). Cuidados especiais devem ser tomados quando este consumo ultrapassa 500 kg/m³, tendo em vista os possíveis problemas de retração e fissuração (GOMES; BARROS, 2009).

3.3.2 Agregados

Tradicionalmente, os agregados foram tratados como material de enchimento no concreto, por não apresentarem reações químicas complexas quando em contato com a água, recebendo assim, uma importância secundária. Tal fato, no entanto, se mostrou equivocado, uma vez que muitas propriedades, como a trabalhabilidade, resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade estão relacionadas com os agregados utilizados (NEVILLE; BROOKS, 2013; METHA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

Os agregados utilizados na produção de CAA devem atender aos mesmos requisitos daqueles utilizados no concreto convencional. As principais características que devem ser observadas nos agregados empregados na confecção do CAA são:

- forma e textura: partículas mais arredondadas e lisas conferem melhor adensabilidade e fluidez, uma vez que apresentam menor área específica volumétrica; já as partículas angulosas e alongadas e de textura áspera demandam maior quantidade de pasta para que não haja prejuízo da trabalhabilidade, elevando o custo do produto final;
- granulometria: quando a distribuição granulométrica não é contínua, há maior quantidade de vazios, maior consumo de cimento e menor fluidez, além de maior tendência à segregação;
- área superficial: quanto menor a área superficial, menor será a quantidade de pasta e água requeridas para obtenção da fluidez desejada;
- massa específica: os agregados comuns possuem massa específica em torno de 2,6 a 2,7 g/cm³; são agregados leves aqueles que apresentam valor inferior a 2,0 g/cm³, enquanto aqueles que apresentam massa específica maior que 3,0 g/cm³ são considerados pesados. Concretos com elevada fluidez e confeccionados com agregados leves podem apresentar segregação, por flutuação das partículas maiores, assim como concretos produzidos com agregados pesados, devido a grande diferença entre a massa específica deles e da argamassa.

Além dos fatores já elencados, é preciso ter em atenção que, no caso do CAA, verifica-se que há necessidade de minimização na porcentagem do agregado graúdo utilizado, dando espaço ao uso de partículas finas, necessárias para se obter

uma viscosidade adequada (MELO, 2005). De acordo com Gomes e Barros (2009) o volume de agregados miúdos varia de 40 a 50% do volume da argamassa, o que corresponde a um consumo aproximado de 710 a 900 kg/m³. Os agregados graúdos, por sua vez, ocupam menor volume no CAA, quando comparado ao concreto convencional, correspondendo de 28 a 35% do volume de concreto, o que representa uma dosagem que varia de 750 a 920 kg/m³ (GOMES; BARROS, 2009).

3.3.3 Adições minerais

As adições são materiais minerais finamente moídos que são adicionados ao concreto a fim de lhe conferir propriedades específicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Geralmente, são divididas em dois grupos: quimicamente ativas (ou reativas) e sem atividade química (ou inertes), consoante a sua ação no concreto.

O uso de adições no CAA é essencial para suprir a necessidade de finos demandada por este tipo de concreto. As partículas finas reduzem a fricção entre os agregados e aumentam a viscosidade, contribuindo para o aumento da coesão. Além disso, promovem a otimização da distribuição granulométrica da mistura, causando melhoria na fluidez do material, no ganho de resistência e na durabilidade (MELO, 2005; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; DACZKO, 2012).

A escolha das adições minerais que serão utilizadas no CAA deve ser baseada em critérios técnicos e econômicos, sendo que podem ser empregadas tanto adições reativas quanto inertes (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). São exemplos de adições reativas a sílica ativa, o metacaulim, a cinza volante, entre outras. As adições ditas inertes são os fílers calcário e basáltico, pó de quartzo, resíduo de beneficiamento de mármore e granito etc. Com relação à dosagem, Alencar e Helene (2006) afirmam que, quanto mais finas forem as adições, menores deverão ser os teores utilizados, devido ao aumento da frequência de contato entre elas, o que influencia no aumento da viscosidade e coesão da mistura.

3.3.4 Aditivos químicos

A utilização de aditivos químicos é imprescindível para a produção do CAA, merecendo destaque o uso dos superplastificantes que, devido a sua alta capacidade de redução de água, são responsáveis pela elevada fluidez da mistura.

Os aditivos modificadores de viscosidade também podem ser utilizados, pois garantem adequada viscosidade e coesão à mistura, evitando a segregação (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009).

No CAA, os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos (terceira geração) são os mais utilizados, pois são mais eficientes na dispersão das partículas de cimento quando comparados aos aditivos de primeira (lignossulfonatos e lignossulfonatos modificados) e segunda gerações (sulfonados de naftaleno-formaldeído e sulfonados de melamina-formaldeído) (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; DACZKO, 2012).

3.3.5 Água

Quanto maior é o teor de água no concreto, menor é a tensão de escoamento e a viscosidade da mistura. Contudo, uma quantidade muito grande de água compromete a resistência mecânica. Assim, parte da água de amassamento deve ser substituída por aditivos superplastificantes, para que os requisitos de resistência e durabilidade não sejam afetados, bem como seja alcançada a fluidez necessária para o CAA.

3.4 Métodos de dosagem

São diversos os métodos de dosagem existentes para o CAA, sendo o primeiro deles desenvolvido por Okamura e Ozawa, em 1995 (OKAMURA; OUCHI, 1998). Com o avanço dos estudos sobre CAA em todo o mundo, foram propostas novas metodologias de dosagem, sendo possível encontrar na literatura especializada uma grande gama de métodos, cada qual com um enfoque específico. Dentre eles destacam-se os propostos por Okamura, Gomes, Tutikian & Dal Molin e Repette-Melo, detalhados a seguir.

3.4.1 Método de Okamura

De modo sucinto, o método proposto por Okamura e Ozawa, em 1995, está baseado em três princípios (OKAMURA; OUCHI, 2003):

- a) conteúdo limitado de agregados no concreto;
- b) baixa relação água/finos;
- c) uso de aditivo superplastificante.

Tal método consiste na limitação da quantidade de agregado graúdo em 50% do volume total de concreto, ao passo que o agregado miúdo é limitado a 40% do volume da argamassa. A dosagem do aditivo superplastificante e a relação água/cimento não são quantificadas, embora os autores especifiquem que esta relação deva se situar entre 0,9 e 1,0, em volume, variando conforme as propriedades dos finos. O teor de aditivo é determinado experimentalmente, até que se alcancem as características desejadas (OKAMURA; OUCHI, 1998; OKAMURA; OUCHI, 2003).

3.4.2 Método de Gomes

Este procedimento de dosagem assume o concreto como material composto por duas fases: pasta e agregados. Possui três etapas básicas: composição da pasta, definição do esqueleto granular e ajuste do volume de pasta no concreto.

Na determinação da composição da pasta é definida a quantidade de aditivo e de adição, pelos ensaios de cone de Marsh e *mini-slump*. O esqueleto granular define a composição dos agregados e é ajustado em função da relação agregado miúdo/agregado graúdo, para se chegar ao menor teor de vazios. Por fim, determina-se o volume mínimo de pasta no concreto para que sejam atingidos os requisitos de autoadensabilidade (GOMES; BARROS, 2009).

3.4.3 Método de Tutikian & Dal Molin

Sinteticamente, o método de dosagem proposto por Tutikian e Dal Molin (TUTIKIAN, 2007; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008) compreende seis etapas. Trata-se de um método experimental, cujo primeiro passo é a escolha dos materiais que serão empregados, que em geral são agregados, cimento, finos e aditivo superplastificante. Em seguida, os agregados e finos devem ser empacotados de

modo sucessivo, dois a dois, partindo-se dos materiais com maior diâmetro, a fim de se obter a maior densidade de empacotamento. Em seguida, a relação água/cimento ou o teor de aditivo superplastificante são fixados, para o traço médio. Os traços rico, médio e pobre são produzidos, mantendo-se constante os percentuais do esqueleto granular e de aditivo superplastificante. A quinta etapa do método compreende a avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos produzidos. Por fim, são traçados os diagramas de dosagem e desempenho, por onde é possível produzir qualquer CAA dentro da faixa de concretos estudados.

3.4.4 Método de Repette-Melo

Dentre os métodos de dosagem desenvolvidos no Brasil, destaca-se o método proposto por Repette-Melo, em 2005, que de modo resumido, consiste em: determinação da relação água/cimento em função da resistência à compressão; estudo reológico da pasta de cimento utilizando o ensaio de fluidez (cone de Marsh) e o ensaio reométrico, com o objetivo de determinar o teor ótimo de adição; estudo reológico da argamassa utilizando o ensaio de fluidez, ensaio de espalhamento e o ensaio reométrico, com o objetivo de determinar os teores ótimos de aditivo superplastificante e de agregado miúdo; e determinação da composição definitiva do CAA, através da incorporação do agregado graúdo e novo ajuste do teor de aditivo (MELO, 2005).

3.5 Procedimentos de ensaio no estado fresco

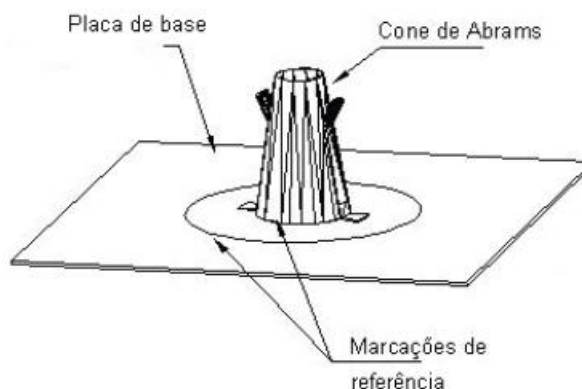
É possível encontrar na literatura especializada diversos procedimentos de ensaio para a avaliação das propriedades do CAA no estado fresco. Nesta seção são apresentados os métodos normativos que foram aplicados no desenvolvimento desta pesquisa.

3.5.1 Habilidade de preenchimento

A habilidade de preenchimento do CAA é avaliada por meio do ensaio de espalhamento (*slump flow test*). O equipamento utilizado consiste de um tronco de

cone metálico aberto em ambas as extremidades (cone de Abrams) e uma placa metálica quadrada, onde o molde é mantido apoiado, e encontra-se ilustrado na Figura 1. A placa deve ser provida de duas marcações circulares centradas com diâmetros de 200 mm e 500 mm.

Figura 1 – Esquema do aparato para o ensaio de espalhamento do CAA.



Fonte: ABNT, 2010b.

O ensaio de espalhamento é o mais utilizado, tanto em laboratório quanto em campo, devido a facilidade e a rapidez de execução e também por utilizar um equipamento (cone de Abrams) que é amplamente usado em concretos convencionais (GOMES; BARROS, 2009).

Este ensaio é normalizado pela NBR 15823-2:2010 – Concreto auto-adensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams (ABNT, 2010b). A classificação do concreto autoadensável em função do espalhamento é estabelecida pela norma NBR 15823-1:2010 – Concreto auto-adensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco (ABNT, 2010a), e é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Classes de espalhamento.

Classe	Espalhamento (mm)
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

Fonte: ABNT, 2010a.

Em um trabalho recente, Desnerck e colaboradores (2014) analisaram os valores reportados em mais de 200 trabalhos científicos, publicados entre 1990 e 2011, sobre as propriedades do CAA no estado fresco e endurecido. Os autores compilaram os dados (1545 composições de CAA) e verificaram que o valor médio de espalhamento relatado foi igual a 690 mm. O valor mínimo de espalhamento encontrado foi de 320 mm, e, o máximo, 933 mm. A maioria dos valores reportados (95,1%) encontra-se inserida na faixa de 550-850 mm, que é a considerada apropriada para CAA (segundo a Norma Europeia EN 206-9:2010). Salienta-se que tal faixa de espalhamento (550-850 mm) é a mesma recomendada pela NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a).

No que tange a especificação de uma classe de espalhamento do CAA, a NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a) sugere que esta seja feita de acordo com a aplicação pretendida, conforme pode ser consultado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação.

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

Fonte: ABNT, 2010a.

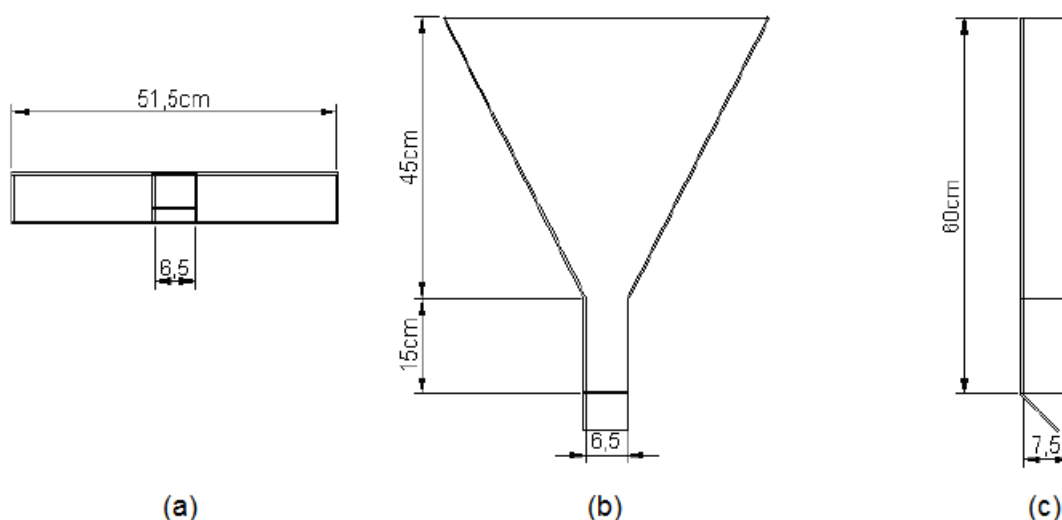
3.5.2 Viscosidade plástica aparente

Segundo a NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a), a viscosidade plástica aparente do CAA pode ser avaliada por meio de dois procedimentos distintos: sob fluxo livre, por meio da medição do tempo de escoamento (t_{500}), e sob fluxo confinado, por meio do funil V.

A medição do tempo de escoamento t_{500} é realizada juntamente com o ensaio de espalhamento e consiste em medir o intervalo de tempo, em segundos, entre o início e o final do escoamento do concreto, a partir do diâmetro do molde (200 mm) até a marcação de 500 mm da placa base (ABNT, 2010b).

O ensaio do funil V avalia a capacidade do concreto autoadensável de passar por seções estreitas. O ensaio consiste em medir o tempo que uma amostra de, aproximadamente, 10 litros de concreto leva para escoar totalmente pelo funil. Neste ensaio também é possível avaliar a tendência à segregação e bloqueio por meio da observação da variação da velocidade de fluxo (MELO, 2005; GOMES; BARROS, 2009). O aparato de ensaio necessário é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Representação do funil V: (a) vista em planta; (b) vista frontal e (c) vista lateral.



Fonte: ABNT, 2010d.

No Brasil, o ensaio do funil V é regulamentado pela NBR 15823-5:2010 – Concreto auto-adensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V (ABNT, 2010d). Já a classificação do CAA conforme a viscosidade plástica aparente é dada pela NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a) e encontra-se apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Classes de viscosidade plástica aparente.

Classe	t_{500} (s)	Classe	Funil V (s)
VS1	≤ 2	VF1	< 9
VS2	> 2	VF2	9 a 25

Fonte: ABNT, 2010a.

O tempo médio de escoamento, por meio do funil V, é de 9,3 s, de acordo com 741 medições reportadas em mais de 200 artigos científicos e compiladas por Desnerck e colaboradores (2014). Os mesmos autores ainda informam que 10% dos resultados estão abaixo de 3,5 s, enquanto que em 90% dos resultados analisados o tempo de escoamento é inferior a 16,0 s.

A NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a) recomenda que a especificação da viscosidade plástica aparente seja feita de acordo com a aplicação pretendida para o CAA. Na Tabela 7 são apresentadas as recomendações de aplicação do CAA conforme a classe de viscosidade plástica aparente.

Tabela 7 – Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação.

Classe de viscosidade	Aplicação	Exemplo
VS1 ou VF1	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação. Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente.
VS 2 ou VF2	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	Vigas, pilares e outras.

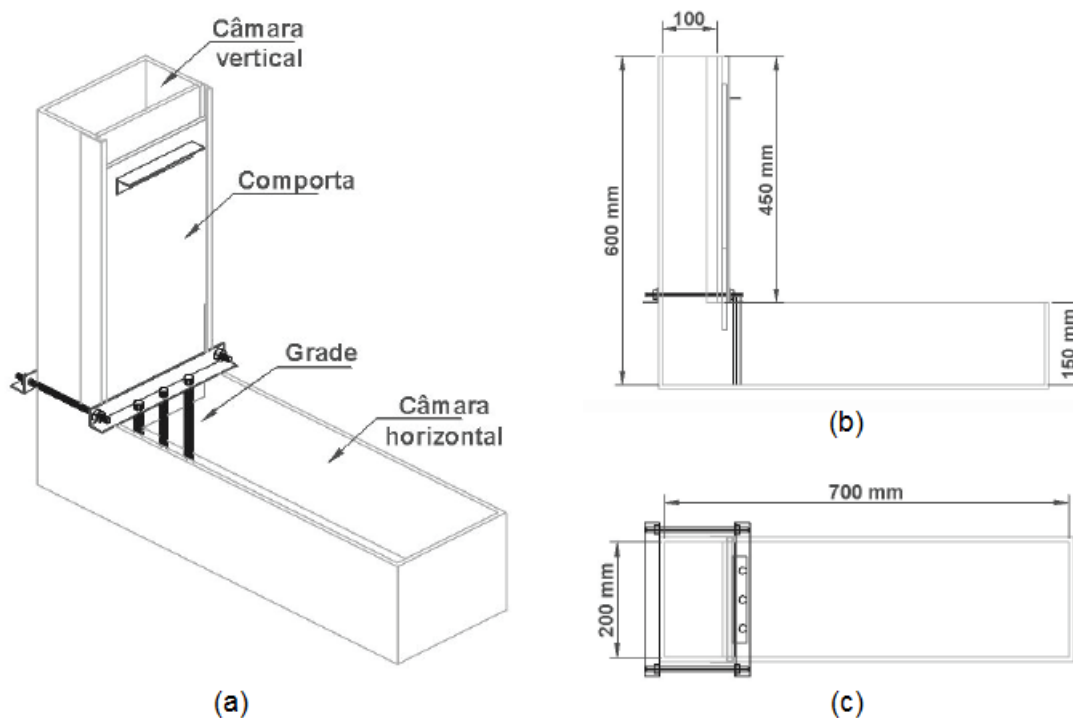
Fonte: ABNT, 2010a.

3.5.3 Habilidade passante

A habilidade passante reflete a capacidade do CAA fluir sob ação do seu próprio peso, sem perder a uniformidade ou causar bloqueio, através de espaços confinados e discontinuidades geométricas, como áreas densamente armadas e embutidos (GOMES; BARROS, 2009; ABNT, 2010b). A avaliação da habilidade passante pode se dar por meio do uso da caixa L, que é composta por dois compartimentos: um depósito vertical e um canal horizontal. A comunicação entre os compartimentos é feita por meio de uma comporta. Após a comporta é colocada uma

grade, onde estão fixadas as barras de armadura. A Figura 3 apresenta uma ilustração do aparato de ensaio.

Figura 3 – Representação da caixa L: (a) perspectiva; (b) vista lateral e (c) vista em planta.



Fonte: ABNT, 2010c.

A determinação da habilidade passante por meio da caixa L deve ser feita em conformidade com o estabelecido pela NBR 15823-4:2010 – Concreto auto-adensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L (ABNT, 2010c). A classificação do CAA em função da habilidade passante é dada pela NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a) e encontra-se transcrita na Tabela 8.

Tabela 8 – Classes de habilidade passante sob fluxo confinado.

Classe	Caixa L (H_2/H_1)
PL1	$\geq 0,80$, com duas barras de aço
PL2	$\geq 0,80$, com três barras de aço

Fonte: ABNT, 2010a.

Segundo o levantamento realizado por Desnerck e colaboradores (2014), e que contou com 563 resultados, o valor médio de habilidade passante é igual a 0,86. O primeiro decil corresponde a habilidade passante inferior a 0,73, ao passo que mais de 90% dos resultados apresentaram valores menores do que 0,97 para

este parâmetro. O valor mínimo relatado foi 0,20 e o máximo, 1,12. Ressalta-se que concretos com habilidade passante inferior a 0,80 não são considerados autoadensáveis, conforme prescreve a NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a). Outro aspecto relevante é que, a máxima relação H_2/H_1 possível é igual a 1,00, sendo que, valores maiores do este podem se referir a erros de medição.

De modo análogo aos ensaios de espalhamento e viscosidade plástica aparente, a NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a) apresenta recomendações acerca da especificação da classe de habilidade passante consoante a aplicação do CAA. Tais recomendações são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação.

Classe de habilidade passante	Aplicação	Exemplo
PL1	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 a 100 mm.	Lajes, painéis, elementos de fundação.
PL2	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 a 80 mm.	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.

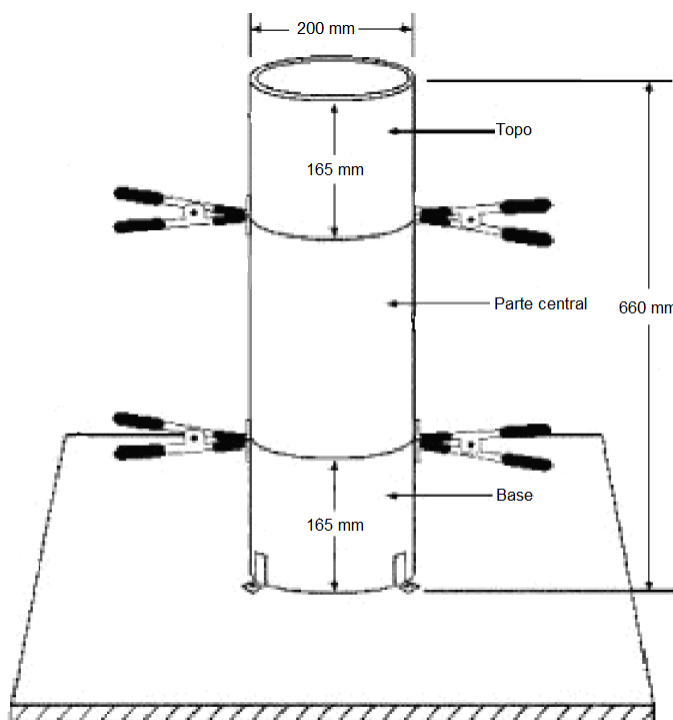
Fonte: ABNT, 2010a.

3.5.4 Resistência à segregação

A determinação da resistência à segregação visa assegurar a homogeneidade e qualidade do CAA. É particularmente importante em concretos de maior fluidez e baixa viscosidade. A avaliação da resistência à segregação é feita pelo método da coluna de segregação (ABNT, 2010a).

O aparato de ensaio é formado por um tubo de PVC, de 200 mm de diâmetro nominal e 660 mm de altura. O tubo deve ser seccionado em três partes: o topo e a base devem ter 165 mm de altura e a parte central deve medir 330 mm. As seções devem estar unidas por grampos, presilhas de fixação ou fita adesiva (ABNT, 2010e). O equipamento acima descrito é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática da coluna de segregação.



Fonte: ABNT, 2010e.

O ensaio da coluna de segregação é normalizado pela NBR 15823-6:2010 – Concreto auto-adensável - Parte 6: Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação (ABNT, 2010e). A classificação do CAA conforme a resistência à segregação é dada pela NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a) e encontra-se apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação.

Classe	Coluna de segregação (%)
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

Fonte: ABNT, 2010a.

A aplicação do CAA pode ser condicionada pela resistência à segregação, sendo então recomendado pela NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a) as especificações contidas na Tabela 11.

Tabela 11 – Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação.

Classe de resistência à segregação	Distância a ser percorrida (m)	Espaço entre armaduras (mm)	Exemplo
SR1	< 5	> 80	Lajes de pequena espessura. Estruturas convencionais de pouca complexidade.
SR2	> 5	> 80	Elementos de fundações profundas. Pilares, paredes e elementos estruturais complexos.
	< 5	< 80	Elementos pré-moldados.

Fonte: ABNT, 2010a.

4 REOLOGIA

4.1 Conceituação

O termo reologia, definido por E. C. Bingham, em 1920, provém do grego *rhein* que significa “escorrer/fluir” e corresponde ao estudo do escoamento e deformação da matéria (IRGENS, 2014). Segundo Schramm (2006), a reologia descreve as deformações dos corpos (podendo estes serem sólidos, líquidos ou gasosos), sob a influência de tensões. Para Banfill (1994) a reologia é a ciência do escoamento e da deformação da matéria, a qual concerne o estudo das interações entre tensão de cisalhamento, taxa de deformação e tempo.

Uma força aplicada a um corpo produz uma deformação. Em sólidos ideais esta deformação é elástica, isto é, a energia necessária para a deformação é totalmente recuperada quando as tensões são removidas, o que implica dizer que o sólido retoma sua posição inicial quando a força é retirada (SCHRAMM, 2006).

Os fluidos ideais, sejam eles gases ou líquidos, se deformam irreversivelmente, ou seja, escoam. Deste modo, a energia necessária para provocar a deformação é dissipada na forma de calor e não pode ser recuperada com a retirada das tensões (SCHRAMM, 2006). Assim, uma força aplicada a um fluido induz o seu escoamento.

O comportamento reológico dos materiais ideais é simples e bastante conhecido, contudo, a maioria dos fluidos e sólidos de interesse tecnológico apresenta características reológicas intermediárias e de maior complexidade (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

De modo geral, o comportamento reológico dos materiais pode ser descrito por meio de relações matemáticas entre a tensão de cisalhamento aplicada (τ) e a sua respectiva deformação ou fluxo (γ), além de suas variações ao longo do tempo. Estas relações são conhecidas como equações de estado reológico ou equações constitutivas (MALKIN, 1994; OLIVEIRA *et al.*, 2000).

4.1.1 Conceitos fundamentais: viscosidade, tensão de cisalhamento e taxa de deformação.

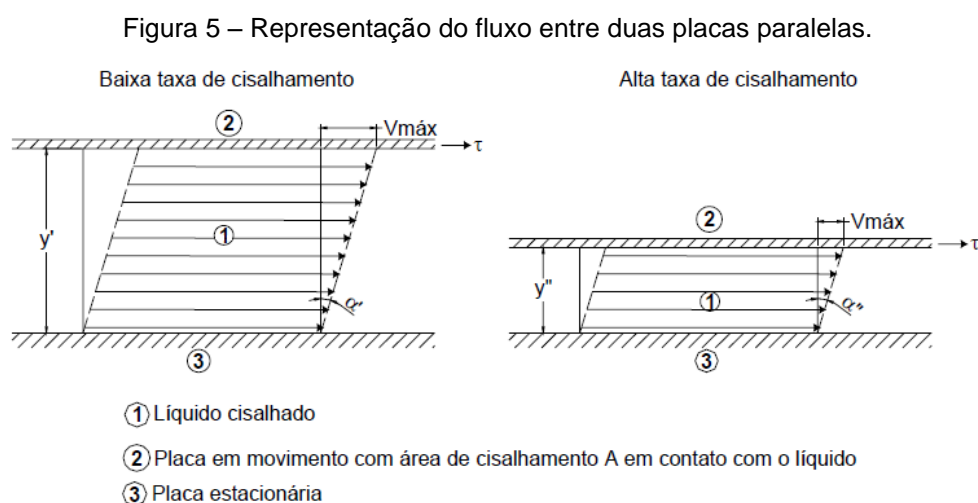
No caso dos fluidos não é possível relacionar a tensão de cisalhamento aplicada (τ) com um valor absoluto de deformação (γ), dado que os fluidos se deformam continuamente, isto é, escoam. Por conta desse fato, se faz necessária a determinação da taxa de deformação do material com o tempo ($\dot{\gamma}$) (OLIVEIRA *et al.*, 2000; SCHRAMM, 2006).

Isaac Newton foi o primeiro a investigar a relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) nos fluidos, estabelecendo que, para um fluido ideal, há uma relação direta de proporcionalidade, expressa na Equação 1 (SCHRAMM, 2006).

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento, μ é a viscosidade e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação.

Desta forma, verifica-se que a viscosidade (μ) é a razão entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação ou cisalhamento ($\dot{\gamma}$). Cabe, então, definir a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. A Figura 5 ilustra o escoamento entre duas placas paralelas.



Fonte: Scramm, 2006.

Ao se aplicar uma força F tangencialmente a área A da placa paralela superior, esta força causará o deslocamento da placa e levará ao escoamento da lâmina líquida. A razão entre a força F e a área A é a tensão de cisalhamento. A velocidade de escoamento que será mantida para uma dada força F é controlada pela resistência interna do líquido, isto é, a viscosidade (SCHRAMM, 2006).

A tensão de cisalhamento induz o líquido a um perfil de escoamento em que a máxima velocidade de escoamento ocorre na interface da placa superior com o líquido, ao passo que na região de contato do líquido com a placa inferior (estacionária) a velocidade é igual a zero. Isto implica que a velocidade diminui gradualmente conforme “atravessa” a camada líquida. Tal gradiente de velocidade é chamado de taxa de cisalhamento ou de deformação e é definida pelo diferencial da velocidade de escoamento pela distância (dv/dy) (SCHRAMM, 2006).

De acordo com Oliveira *et al.* (2000), a viscosidade é a principal propriedade reológica de um fluido, uma vez que indica sua facilidade de escoar continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa.

Todos os fluidos que apresentam comportamento reológico que pode ser descrito pela Equação 1 são denominados fluidos Newtonianos. Este é o caso de grande parte dos líquidos puros e suspensões bastante diluídas, como água, mel, acetona, glicerina etc., para os quais a viscosidade é uma característica intrínseca do fluido que depende apenas da temperatura e da pressão (OLIVEIRA *et al.*, 2000; SCHRAMM, 2006; CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

Entretanto, conforme já mencionado, grande parte dos fluidos não apresentam uma relação linear entre tensão e taxa de cisalhamento. Deste modo, a viscosidade destes fluidos não é somente afetada pela temperatura e pela pressão, como também pela taxa de cisalhamento, pela natureza físico-química do fluido, pelo tempo/histórico de cisalhamento e campo elétrico (BARNES; HUTTON; WALTERS, 1989; SCHRAMM, 2006).

4.1.2 Tensão de escoamento

Alguns fluidos necessitam da aplicação de uma tensão mínima de cisalhamento para que seu escoamento se inicie, de modo que, quando submetidos a tensões inferiores à tensão de cisalhamento mínima, estes fluidos se comportam

como sólidos elásticos. Esta tensão mínima é denominada tensão de escoamento (τ_0) (OLIVEIRA *et al.*, 2000; CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

A explicação para a existência da tensão de escoamento reside no fato de que, alguns fluidos, quando em repouso, consistem de uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir a tensões inferiores a τ_0 . No entanto, estas estruturas se rompem quando as tensões aplicadas superam a tensão de escoamento, fazendo com que o fluido apresente comportamento viscoso (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

Segundo Oliveira *et al.* (2000), o principal fator para a formação de estruturas rígidas tridimensionais é a atração entre as partículas da suspensão. Partículas com elevada área superficial específica ou que apresentam cargas elétricas superficiais de sinais opostos, são mais suscetíveis a atuação de forças de atração.

4.2 Comportamento reológico dos fluidos

As relações entre a tensão aplicada e a respectiva deformação são utilizadas para determinar o comportamento reológico dos fluidos. Tais relações são denominadas equações de estado reológico e tem como propósito descrever, qualitativa e quantitativamente, as várias “anomalias” observadas em fluidos ou sólidos que se afastam do comportamento apresentado pelos modelos ideais (Newtoniano para fluidos e Hookeano para sólidos) (MALKIN, 1994).

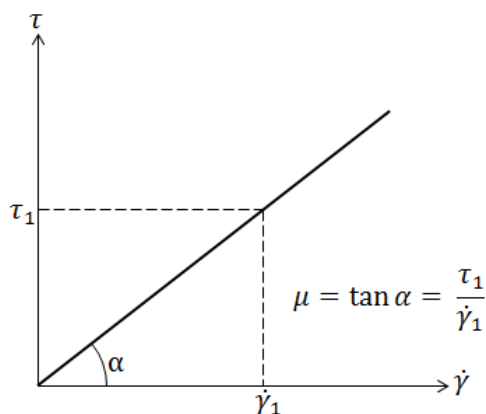
Os fluidos são classificados em função de seu comportamento como Newtonianos ou não-Newtonianos.

4.2.1 Fluidos Newtonianos

Os fluidos Newtonianos são aqueles em que a tensão de cisalhamento (τ) é diretamente proporcional a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), sendo a viscosidade (μ) a constante de proporcionalidade, que depende somente do material, da temperatura e pressão (CHHABRA; RICHARDSON, 2008). A equação que descreve o comportamento destes fluidos é Equação 1, apresentada no item 4.1.1. A

representação gráfica do comportamento de um fluido Newtoniano é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Curva de fluxo de um fluido Newtoniano.



Fonte: Schramm, 2006.

4.2.2 Fluidos não-Newtonianos

Nos fluidos não-Newtonianos a relação entre tensão de cisalhamento (τ) e taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) não é linear. Assim, a viscosidade (μ) deixa de ser uma característica intrínseca do fluido e passa a depender de outras variáveis já mencionadas. Os fluidos não-Newtonianos podem ser divididos em (CHHABRA; RICHARDSON, 2008):

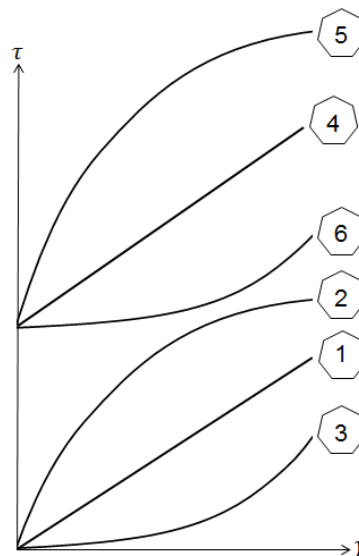
- fluidos independentes do tempo: são aqueles nos quais a taxa de cisalhamento em qualquer ponto é determinada somente pelo valor da tensão de cisalhamento aplicada no ponto naquele instante;
- fluidos dependentes do tempo: são mais complexos, e nos quais a relação tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento depende da duração do cisalhamento;
- fluidos viscoelásticos: são aqueles que apresentam características entre fluidos ideais e sólidos elásticos, exibindo recuperação elástica parcial, após a deformação.

Os fluidos não-Newtonianos independentes do tempo são divididos em três grupos (SCHRAMM, 2006; CHHABRA; RICHARDSON, 2008):

- pseudoplásticos: tal comportamento é observado quando a viscosidade aparente do fluido, ou seja, a relação $\tau/\dot{\gamma}$ diminui com o aumento da taxa e/ou da tensão de cisalhamento, de modo que o fluido torna-se menos espesso;
- dilatantes: este comportamento é caracterizado pelo aumento da viscosidade aparente do fluido à medida que se eleva a taxa e/ou a tensão de cisalhamento, fazendo com que o fluido se torne mais espesso;
- plásticos: são aqueles que apresentam comportamento de um sólido ideal até que sejam submetidos a tensões de cisalhamento maiores do que uma tensão mínima, denominada tensão de escoamento (τ_0). Uma vez excedida a tensão de escoamento, a curva de fluxo do fluido poderá apresentar uma relação entre $\tau/\dot{\gamma}$ linear ou não-linear, mas que nunca interceptará a origem.

A Figura 7 ilustra as relações entre tensão e taxa de cisalhamento para os fluidos não-Newtonianos independentes do tempo.

Figura 7 - Curvas de fluxo dos fluidos: (1) Newtoniano; (2) pseudoplástico; (3) dilatante; (4) plástico ou de Bingham; (5) pseudoplástico com tensão de escoamento e (6) dilatante com tensão de escoamento.



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.*, 2000.

Diversos modelos matemáticos procuram relacionar a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação observada para um determinado fluido. Para muitos dos fluidos não-Newtonianos esta relação pode ser representada pelo modelo exponencial, conforme descreve a Equação 2:

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento, k é o índice de consistência, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação e n é o índice de escoamento. Há de se observar que, quando n tem o valor de 1 e k é igual a μ , o fluido apresenta comportamento Newtoniano. Para $n < 1$, tem-se um fluido pseudoplástico e, quando $n > 1$, o comportamento do fluido é dilatante. De acordo com Oliveira *et al.* (2000), a Equação 2 é a mais utilizada para descrever a pseudoplasticidade e a dilatância dos fluidos.

O comportamento de fluidos que apresentam tensão de escoamento (τ_0) também pode ser descrito por equações de estado reológico, sendo o modelo mais simples aquele onde a relação $\tau/\dot{\gamma}$ é linear, expressado pela Equação 3:

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \dot{\gamma} \quad (3)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento, τ_0 é a tensão de escoamento, μ_{pl} é a viscosidade plástica e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação. Os fluidos que apresentam o comportamento descrito pela Equação 3 são conhecidos como fluidos de Bingham ou Binghamianos.

Entretanto, grande parte dos fluidos que apresentam tensão limite de escoamento são caracterizados por comportamentos mais complexos do que o descrito pela equação de estado reológico dos fluidos de Bingham. Deste modo, outros modelos reológicos foram sugeridos para descrever o comportamento desses fluidos. A título de exemplo, inserem-se as equações propostas por Casson (Equação 4) e por Herschel-Bulkley (Equação 5):

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu_c \dot{\gamma}} \quad (4)$$

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

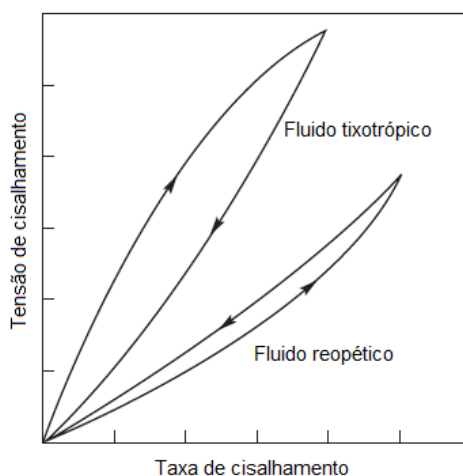
onde τ é a tensão de cisalhamento, τ_0 é a tensão de escoamento, μ_c é a viscosidade de Casson, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, k é o índice de consistência e n é o índice de comportamento. Salienta-se que, no modelo proposto por Herschel-Bulkley, quando $n < 1$, tem-se o comportamento de um fluido pseudoplástico com tensão de

escoamento, quando $n > 1$, o fluido apresenta dilatância e tensão de escoamento, e, por fim, quando n é 1 e k é igual a μ_{pl} , esta equação se reduz ao modelo de Bingham.

No tocante aos fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo cabe dizer que são subdivididos em dois grupos (OLIVEIRA *et al.*, 2000; CHHABRA; RICHARDSON, 2008):

- tixotrópicos: representam os fluidos que, quando cisalhados a uma taxa constante, apresentam redução de sua viscosidade aparente (ou na correspondente tensão de cisalhamento) ao longo do tempo. Fluidos tixotrópicos irão apresentar uma curva de histerese, conforme se ilustra na Figura 8. De modo geral, quanto maior a área delimitada pela curva de histerese, mais forte é a dependência do tempo no comportamento do fluido. Fluidos independentes do tempo não apresentam curva de histerese;
- reopéticos: nesses fluidos ocorre o aumento da viscosidade aparente em função do tempo, quando submetidos a taxa ou tensão de cisalhamento constante. A reopexia é considerada um fenômeno contrário a tixotropia, fazendo com que também seja conhecida como tixotropia negativa. Os fluidos reopéticos também apresentam curva de histerese, conforme se ilustra na Figura 8.

Figura 8 – Curvas de fluxo de fluidos dependentes do tempo.



Fonte: Chhabra; Richardson, 2008.

4.3 Reologia dos materiais cimentícios

O concreto fresco pode ser descrito como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em uma dispersão viscosa (pasta de cimento). Tal pasta é composta por partículas (grãos de cimento) e um líquido (água), não se comportando, portanto, como um líquido puro (BARTOS, 1992; FERRARIS, 1999). Para Toutou e Roussel (2006), o concreto é uma suspensão de grãos de vários tamanhos em uma fase fluida contínua (água).

Reis (2008) afirma que o comportamento do concreto fresco é dependente da viscosidade da pasta de cimento e da quantidade de agregados. Assim, é adequado aplicar a reologia para a análise do comportamento à deformação do concreto, da argamassa e da pasta de cimento no estado fresco.

O comportamento reológico dos materiais cimentícios pode ser caracterizado como Newtoniano ou não-Newtoniano, dependendo da composição do material. Segundo Ferraris, Obla e Hill (2001), as propriedades de escoamento da pasta de cimento são semelhantes às de um fluido Newtoniano ou de um fluido Binghamiano. Já as argamassas e concretos apresentam, na maioria das vezes, um comportamento de fluido não-Newtoniano com uma tensão limite de escoamento. De um modo geral, os modelos reológicos mais adequados para descrever o comportamento desses materiais são os modelos de Bingham e de Herschel-Bulkley (DE LARRARD; FERRARIS; SEDRAN, 1998; PETROU *et al.*, 2000; BARBOSA *et al.*, 2011).

Algumas considerações acerca das técnicas de caracterização reológica, bem como do comportamento reológico de pastas, argamassas e concretos relatados na literatura são apresentadas a seguir.

4.3.1 Caracterização reológica dos materiais cimentícios

Testes empíricos, tais como o abatimento de tronco de cone, espalhamento, cone de Marsh, funil V e caixa L, têm sido utilizados para qualificar propriedades como consistência, capacidade de escoamento, bombeabilidade e, até mesmo, algum parâmetro reológico (viscosidade e tensão de escoamento) dos materiais cimentícios. Outros equipamentos, mais sofisticados, os reômetros,

também têm sido utilizados para esta finalidade (TOUTOU; ROUSSEL, 2006; OLIVEIRA, 2013).

Os testes mais comuns são capazes de medir apenas um parâmetro reológico, seja este relacionado à viscosidade ou à tensão de escoamento. O cálculo do outro parâmetro a partir do resultado obtido é, na maioria dos casos, muito difícil ou até mesmo impossível, existindo, então, apenas uma correlação entre eles (FERRARIS, 1999; CASTRO, 2007). Deste modo, quando existe a necessidade da caracterização da tensão de escoamento e da viscosidade é preciso recorrer aos ensaios reométricos.

A seguir são apresentados alguns dos ensaios capazes de medir os parâmetros reológicos dos materiais à base de cimento. Maior ênfase será dada aos ensaios empregados nesta pesquisa.

4.3.1.1 Ensaios que medem um parâmetro reológico

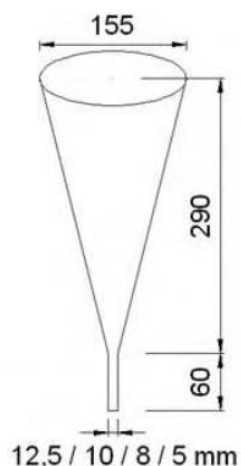
Os ensaios de abatimento de tronco de cone, espalhamento, de penetração (*Kelly ball*, Vicat, Wigmore) e K de Nasser estão relacionados ao parâmetro reológico tensão de escoamento, pois medem a capacidade do concreto iniciar seu escoamento. Por outro lado, os ensaios de Ve-Be, cone de Marsh, caixa L, funil V e aparelhagem Orimet são associados à viscosidade plástica, dado que medem a capacidade de escoamento do concreto, o que somente ocorre após ultrapassada a tensão de escoamento (FERRARIS; DE LARRARD; MARTYS, 2001; CASTRO, 2007).

Uma descrição detalhada de todos os ensaios acima mencionados não faz parte do escopo deste trabalho. Deste modo, uma breve descrição dos ensaios que serão empregados nesta pesquisa é feita a seguir:

- ensaio de espalhamento: o procedimento para a realização deste ensaio encontra-se descrito em detalhes no item 3.5.1, motivo pelo qual não são tecidas maiores considerações;
- funil V: este ensaio já encontra-se descrito em detalhes no item 3.5.2;
- caixa L: o procedimento de ensaio pode ser consultado no item 3.5.3 deste trabalho;
- cone de Marsh: trata-se de um ensaio muito simples que tem sido usado para o estudo da fluidez de pastas de cimento e argamassas e para a

determinação do teor ótimo de superplastificante para as misturas. Este ensaio também pode ser usado para a determinação da proporção ótima de adição mineral incorporada à mistura. A Figura 9 ilustra o equipamento do cone de Marsh.

Figura 9 – Representação esquemática do cone de Marsh.



Fonte: Gomes; Barros, 2009.

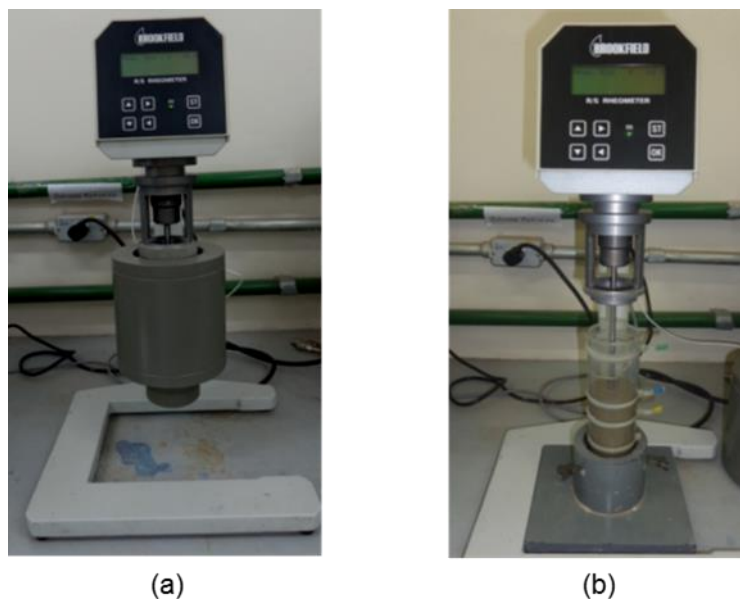
4.3.1.2 Ensaio que medem dois parâmetros reológicos

De acordo com Castro (2007), há ensaios capazes de medir os dois parâmetros reológicos que caracterizam os materiais cimentícios. Porém, nem todos permitem o cálculo direto da viscosidade plástica e da tensão de escoamento, de forma que os resultados obtidos nesses ensaios estão relacionados aos dois parâmetros reológicos. Os ensaios que medem dois parâmetros reológicos são: o de dois pontos (*two point workability test*); o abatimento de tronco de cone modificado e o reométrico. Os dois primeiros ensaios mencionados não fazem parte do escopo desta pesquisa, portanto, somente ensaio reométrico é descrito.

Os equipamentos que medem as propriedades viscoelásticas de sólidos, semi-sólidos e fluidos são denominados reômetros (SCHRAMM, 2006). Há grande gama de reômetros, tendo cada qual enfoque e aplicações específicas. Os reômetros mais utilizados para a avaliação de materiais cimentícios são do tipo placas paralelas, cilindros coaxiais e cone-placa (OLIVEIRA, 2013). O sistema de palhetas Vane também tem sido utilizado para esta finalidade (VITA, 2011).

O reômetro utilizado neste trabalho emprega a geometria de cilindros coaxiais que, de acordo com Schramm (2006), são compostos por um cilindro interno (*spindle*) e outro externo (copo). O fluido preenche o espaço entre os dois cilindros (*gap*) e é submetido a um cisalhamento por tempo determinado. A distância entre os cilindros é constante, assim, os ensaios ficam limitados aos materiais que contêm tamanho de partícula menor do que $1/3$ do tamanho dessa distância (*gap*). Também foi utilizado o sistema Vane, pois, segundo Vita (2011), utiliza-se esta configuração quando há necessidade de avaliar suspensões que contêm partículas maiores do que as especificadas para os ensaios com reômetros de cilindros coaxiais. A palheta Vane é caracterizada por possuir uma superfície plana de medição que se fixa no material amostrado e o empurra conforme ocorre o movimento de rotação. O reômetro utilizado nesta pesquisa está ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Reômetro R/S Rheometer utilizado: (a) sistema de cilindros coaxiais e (b) sistema Vane.



Fonte: o próprio autor.

4.3.2 Reologia das pastas

O estudo da reologia da pasta de cimento pode prover informações importantes sobre sua microestrutura e interação entre seus componentes, sendo essencial para o completo entendimento do comportamento do concreto no estado fresco (BARTOS, 1992). Além disso, também é útil para a seleção do tipo e

dosagem de adições minerais, a fim de melhorar a trabalhabilidade do concreto (FERRARIS; OBLA; HILL, 2001)

Segundo Ferraris (1999) o comportamento reológico das pastas de cimento é similar ao de um fluido Newtoniano ou Binghamiano, variando em função da composição da pasta. Bartos (1992), por sua vez, argumenta que a maioria das investigações publicadas relata que o comportamento da pasta de cimento é semelhante ao de um fluido Binghamiano. No entanto, o mesmo autor salienta que as pastas de cimento podem apresentar comportamento reológico que varia desde Newtoniano até mesmo pseudoplástico, podendo inclusive exibir tensão de escoamento.

Há forte relação entre o comportamento reológico das pastas e o desenvolvimento dos produtos de hidratação do cimento (BARTOS, 1992). De acordo com Vance, Sant e Neithalath (2015), o estudo reológico da pasta de cimento pode servir como forma de monitoramento do desenvolvimento da microestrutura, que é responsável pelas propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios.

O comportamento reológico das pastas de cimento nas primeiras idades é reflexo do estado de flocculação das partículas de cimento, que estão sujeitas a um equilíbrio entre as forças interparticulares atrativas e repulsivas (eletrostáticas, van der Waals e capilares). A magnitude dessas forças varia dependendo principalmente do tamanho das partículas e da distância entre elas (BARTOS, 1992).

Ferraris, Obla e Hill (2001) consideram o reômetro de placas paralelas o mais adequado para a caracterização reológica das pastas, uma vez que essa geometria permite uma melhor representação das ações de cisalhamento que serão impostas à pasta quando esta for compor o concreto. Para Bartos (1992), a forma mais comum de avaliar o comportamento reológico das pastas de cimento é através da reometria rotacional, com o uso de cilindros coaxiais.

De acordo com Banfill (2005), as pastas de cimento apresentam tensão limite de escoamento que varia de 10-100 Pa e viscosidade aparente de 0,01-1 Pa.s. A título de exemplo inserem-se alguns resultados provenientes de avaliações reológicas de pastas de cimento.

Em um estudo conduzido por Ferraris, Obla e Hill (2001), os autores verificaram que a substituição do cimento por sílica ativa (teor de 8%, em massa) resultou em aumento da tensão de escoamento e da viscosidade, quando

comparado a pasta de cimento sem adição; quando o cimento foi substituído por metacaulim (teor de 8%, em massa), os parâmetros reológicos se mostraram semelhantes aos da pasta de referência e, por fim, quando foi utilizada cinza volante ultrafina (teor de 12% de substituição) houve decréscimo na tensão de escoamento e na viscosidade aparente.

Girotto (2012) realizou a avaliação reométrica de pastas de cimento com adições de sílica ativa e fíler basáltico, em diferentes percentuais, para obter o ponto ótimo de dosagem de cada adição. O autor verificou comportamento Binghamiano para todas as pastas estudadas. Também foi observado que a tensão de escoamento e a viscosidade aparente das pastas aumentavam com o acréscimo das adições nas pastas de cimento. Outro ponto importante verificado foi que nas pastas contendo sílica ativa houve um claro acréscimo nos parâmetros reológicos ao longo do tempo, para todas as porcentagens de substituição estudadas (de 2 a 10%, em relação à massa de cimento), ao passo que, para o fíler basáltico somente se verificaram acréscimos significativos quando o teor de adição na mistura foi maior do que 20% no caso da tensão de escoamento e, maior do que 25% no caso da viscosidade.

Em um estudo realizado por Chen e Kwan (2012), no qual os autores avaliaram os parâmetros reológicos de pastas de cimento com adição de cimento superfino ($d_{50} = 3,1 \mu\text{m}$), na proporção de 0, 10 e 20%, e relação água/cimento (a/c) variando de 0,18 até 0,30, foi constatado que as pastas apresentaram tensão de escoamento e comportamento dilatante, sendo utilizado o modelo de Herschel-Bulkley para ajustar os dados experimentais. A tensão de escoamento variou de 0,96-33,43 Pa, ao passo que a viscosidade das pastas apresentaram-se dentro do intervalo de 0,71-5,03 Pa.s. Os autores ainda observaram que, quanto maior a relação a/c , menor a tensão de escoamento e a viscosidade. Também visualizaram que, para relações $a/c \leq 0,22$, a adição de cimento superfino ocasionou diminuição da tensão de escoamento e da viscosidade, sendo o comportamento inverso observado para as relações $a/c \geq 0,24$.

Em um estudo de pastas de cimento com adição de sílica ativa para a composição de concreto de alto desempenho, Oliveira (2013) observou que as pastas estudadas se comportavam como fluidos newtonianos, exibindo, portanto, um único parâmetro reológico, a viscosidade. A autora verificou também que, quanto maior o teor de substituição do cimento por sílica, maior a viscosidade da pasta.

Além disso, observou incremento na viscosidade ao longo do tempo, dado que as pastas foram ensaiadas aos 5, 15 e 30 minutos após a incorporação do aditivo superplastificante. Nesse estudo, a viscosidade das pastas variou de 0,1313 a 0,2391 Pa.s.

4.3.3 Reologia das argamassas

Segundo Paiva *et al.* (2015), a avaliação das propriedades reológicas das argamassas constitui uma maneira adequada de prever o comportamento reológico do concreto.

Banfill (2005) considera a argamassa como fluido Binghamiano, sendo que as propriedades reológicas das argamassas são intermediárias entre as da pasta de cimento e do concreto. O mesmo autor ainda considera os intervalos 80-400 Pa e 1-3 Pa.s como valores típicos de tensão de escoamento e viscosidade, respectivamente, para as argamassas. Oliveira (2013) ressalta que as argamassas apresentam, na maioria das vezes, comportamento de um fluido não-Newtoniano com a presença de tensão de escoamento, o que faz dos modelos de Bingham e de Herschel-Bulkley os mais adequados para descrever o comportamento destes materiais cimentícios.

Uma das formas de avaliar o comportamento reológico das argamassas é por meio de reômetros de cilindros coaxiais (BANFILL, 1987). Contudo, devem-se ter em conta os seguintes fatores quando se faz uso dessa geometria de reômetro na avaliação reológica de argamassas: o *gap* entre os cilindros deve ser, pelo menos, dez vezes maior que o diâmetro máximo da partícula; a razão entre os diâmetros dos cilindros externo e interno não deve ser maior que 1,2; e, por fim, a razão altura/diâmetro dos cilindros não deve ser menor que 1,0 (BANFILL, 1994).

Em um estudo conduzido por Banfill (1994) foram avaliadas as influências de diversos fatores no comportamento reológico das argamassas. Estes dados são aqui transcritos e apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Efeitos dos materiais constituintes na reologia das argamassas.

Alteração na dosagem da argamassa	Efeito na	
	Tensão de escoamento	Viscosidade plástica
Incremento de água	Decréscimo	Decréscimo
Incremento de areia	Acréscimo	Acréscimo
Incremento de cimento	Acréscimo	Acréscimo
Incremento de areia fina	Acréscimo	Acréscimo/Nenhuma mudança
Adição de plastificante	Decréscimo	Nenhuma mudança
Adição de incorporador de ar	Nenhuma mudança	Decréscimo
Substituição do cimento por cinza volante	Decréscimo	Decréscimo
Substituição do cimento por sílica	Acréscimo	Decréscimo

Fonte: Banfill, 1994.

Em um estudo que verificou a influência do tamanho das partículas (diâmetros de 0-0,315 mm e de 0,315-0,600 mm) e do volume de areia (de 5 a 35%) em argamassas, Toutou e Roussel (2006) observaram comportamento dilatante com presença de tensão de escoamento em todas as argamassas estudadas. Os resultados indicaram que, quanto maior o teor de areia, maior será a tensão de escoamento. Os autores ainda observaram que a utilização de areia mais fina (0-0,315 mm) provocou maior aumento na tensão de escoamento do que a areia em fração mais grossa (0,315-0,600 mm).

Girotto (2012) utilizou a reometria para a determinação do teor ótimo de agregado miúdo e de aditivo superplastificante em argamassas de concretos autoadensáveis, que continham duas adições: sílica ativa e fíler basáltico. O comportamento reológico exibido pelas argamassas foi o de um fluido de Bingham. O autor observou que, conforme o acréscimo de areia, maior a tensão de escoamento para todas as argamassas estudadas. No entanto, para as argamassas que continham fíler basáltico foi observado decréscimo da viscosidade conforme a incorporação da areia. Foi verificado ainda que a incorporação de aditivo superplastificante levou à diminuição da tensão de escoamento e também da viscosidade.

Oliveira (2013) utilizou a análise reométrica para a determinação do teor ótimo de aditivo superplastificante em argamassas destinadas à produção de concreto de alto desempenho. As argamassas exibiram comportamento Binghamiano. A autora selecionou o teor ótimo com base na viscosidade

apresentada pelas argamassas, verificando que, a partir do teor de 1% (em relação à massa de cimento), o aditivo não aumentava significativamente a fluidez das misturas. O ensaio do cone de Marsh também foi realizado com a mesma finalidade e os resultados obtidos se correlacionaram com o resultado da reometria rotacional.

4.3.4 Reologia dos concretos

Apesar da complexidade desse material, a principal propriedade do concreto fresco, a trabalhabilidade, ainda é medida utilizando-se o ensaio de abatimento de tronco de cone. Sabe-se, no entanto, que dois concretos com mesmo abatimento podem apresentar comportamentos distintos durante o lançamento. Tal fato está relacionado com a viscosidade plástica, que não é medida no teste de abatimento de tronco de cone, que, por sua vez, está correlacionado ao parâmetro reológico tensão de escoamento (FERRARIS; DE LARRARD; MARTYS, 2001).

O comportamento reológico do concreto fresco pode ser descrito como o de um fluido Binghamiano (TATTERSALL, 1991; HU; DE LARRARD, 1996). O modelo de Herschel-Bulkley também tem sido utilizado para descrever a reologia do concreto, especialmente de concretos autoadensáveis (DE LARRARD; FERRARIS; SEDRAN, 1998). De todo modo, é consenso que são necessários dois parâmetros (tensão de escoamento e viscosidade) para a caracterização do comportamento reológico do concreto fresco.

De acordo com Ferraris, de Larrard e Martys (2001) a determinação dos parâmetros reológicos é muito importante, em especial para concretos que demandam maior controle da trabalhabilidade, como é o caso dos concretos autoadensáveis e dos de alto desempenho.

A avaliação dos parâmetros reológicos do concreto não é uma tarefa simples, devido a grande variedade de tamanho de partículas encontradas nessa dispersão (desde partículas menores que 1 μm , até maiores que dezenas de milímetros) (FERRARIS, 1999). Além disso, há outra dificuldade associada com a determinação do comportamento reológico do concreto, que é a necessidade de reômetros com capacidade de acomodar partículas “grandes”, algumas vezes com dimensão maior que 20 mm (BANFILL, 2011; FERRARIS; MARTYS, 2012). Reômetros utilizados para caracterização de polímeros ou óleos possuem um *gap* entre os planos de cisalhamento de apenas alguns milímetros ou menos. Para a

determinação dos parâmetros reológicos do concreto é necessário que este *gap* possua pelo menos cinco vezes o tamanho da maior partícula de agregado (FERRARIS; MARTYS, 2012).

De acordo com Banfill (2005) o concreto apresenta valores típicos de tensão limite de escoamento e viscosidade plástica que variam de 500-2000 Pa e 50-100 Pa.s, respectivamente. Ainda segundo o mesmo autor, tais valores são sensivelmente diferentes para o concreto autoadensável, no qual a tensão de escoamento varia de 50-200 Pa e a viscosidade plástica situa-se entre 20-100 Pa.s.

Castro (2007), em um extenso programa experimental que avaliou os parâmetros reológicos de concretos de alto desempenho, concluiu que este material se comporta como fluido Binghamiano. Nesse trabalho também foi verificada a influência dos misturadores, de dois tipos de cimento, da utilização de sílica ativa e também a correlação dos valores obtidos nos ensaios reométricos com os valores obtidos nos ensaios empíricos. A autora constatou que há boa correlação (coeficiente superior a 0,80) entre os parâmetros reológicos medidos pelo reômetro com os valores obtidos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado. Os valores de torque de escoamento obtidos variaram entre 0,86 e 2,09 Nm, ao passo que a viscosidade de torque dos concretos estudados variou de 0,643 até 1,561 Nm.s.

Em um estudo que verificou a influência dos agregados graúdos na reologia do concreto, Hu e Wang (2011) concluíram que os parâmetros reológicos aumentaram conforme o incremento do teor de agregados graúdos na mistura. Foi observado também que agregados bem graduados favorecem a diminuição da tensão de escoamento e da viscosidade do concreto, quando comparados a agregados de único tamanho. Os autores ainda verificaram que, quanto maior as partículas do agregado graúdo, menor serão a viscosidade e tensão de escoamento, contudo, tal efeito não é tão claro quando se combinam os efeitos do tamanho das partículas e da graduação dos agregados.

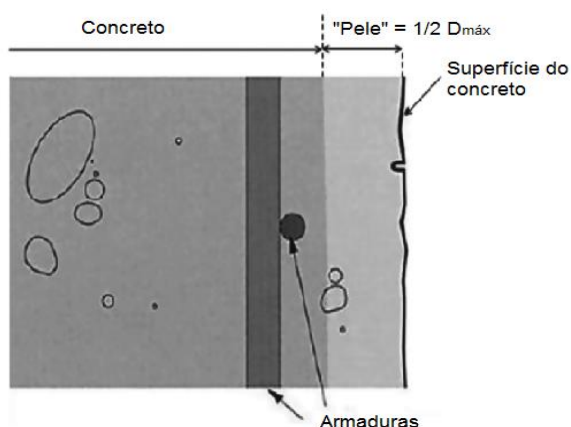
Estudando a influência causada pela substituição do cimento por sílica ativa nas propriedades reológicas de concretos autoadensáveis, Lu, Yang e Mei (2015) verificaram que há um incremento gradual na tensão de escoamento consoante o aumento do teor de sílica ativa. No entanto, foi observada a diminuição da viscosidade plástica das misturas que empregaram até 4% de sílica ativa, sendo que houve aumento gradual desse parâmetro para teores maiores de substituição.

Os autores ainda avaliaram a evolução do comportamento reológico das misturas ao longo do tempo. A tensão de escoamento variou entre 21-150 Pa, aos 10 minutos, e entre 83-369 Pa, aos 120 minutos. O incremento na viscosidade plástica foi mais sutil, partindo de valores entre 20,6-29,7 Pa.s, aos 10 minutos, até 25,7-33,4 Pa.s, aos 120 minutos.

4.4 A influência dos parâmetros reológicos no acabamento superficial dos compósitos cimentícios

A camada superficial do concreto pode ser considerada sua “pele”. Segundo Kreijger (1984), três “peles” podem ser identificadas no concreto: a “pele” de pasta de cimento, com espessura de, aproximadamente 0,1 mm; a “pele” de argamassa, com 5 mm de espessura; e, a “pele” de concreto, com espessura próxima a 30 mm. Tais “peles” são causadas pelo efeito parede, processos de sedimentação e segregação, métodos de compactação e a exsudação de água. Segundo Dieryck *et al.* (2005), em termos de aparência ou avaliação estética, a “pele” de concreto pode corresponder a profundidade de metade do diâmetro máximo do agregado, conforme se ilustra na Figura 11.

Figura 11 – Representação esquemática da “pele” de concreto.



Fonte: adaptado de Dieryck *et al.*, 2005.

A aparência do concreto é, em geral, caracterizada em termos de cor e textura. A cor é condicionada pelas características físicas da “pele” de concreto e depende, fundamentalmente, da composição química do cimento e dos agregados,

assim como da porosidade da “pele” de concreto. As condições de moldagem também possuem influência significativa na cor do concreto (COURARD *et al.*, 2012).

A qualidade do acabamento superficial dos concretos também está relacionada à textura, que depende principalmente das propriedades físico-químicas da “pele” de concreto, em nível microscópico. Outros parâmetros influenciam a textura do concreto, incluindo o tipo e a qualidade dos materiais, relação água/cimento, condições ambientais de trabalho, lançamento e cura, e o material das fôrmas (COURARD *et al.*, 2012).

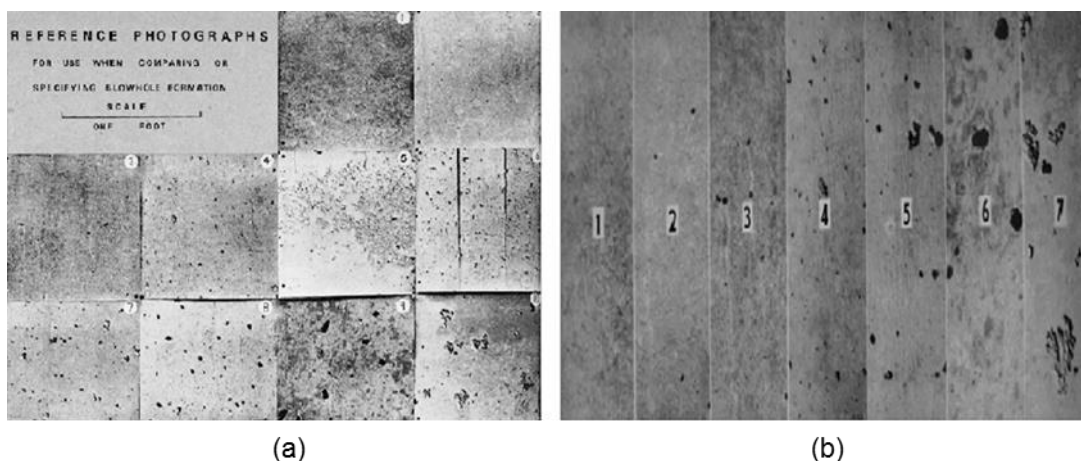
Diversos defeitos podem afetar as superfícies de concreto, tais como: diferença de coloração; “bicheiras” (*honeycombing*); textura arenosa; impurezas; fissuras e bolhas de ar (*blowholes, pinholes, bugholes, air voids*) (BISSONNETTE; COURARD; GARBACZ, 2016). No presente trabalho a qualidade do acabamento superficial foi avaliada em termos de quantificação de bolhas de ar, motivo pelo qual não se deu ênfase aos outros tipos de imperfeições superficiais.

As bolhas de ar ou poros superficiais são um dos principais defeitos encontrados nas superfícies dos materiais cimentícios. Os poros superficiais são imperfeições causadas por bolhas de ar ou água que ficam presas na interface fôrma/concreto (OZKUL; KUCUK, 2011; BENITO *et al.*, 2015). Esses defeitos aparecem na forma de cavidades regulares ou irregulares, geralmente distribuídos de forma aleatória pela superfície do concreto, com diâmetros que variam desde quase imperceptíveis até 25 mm, mas que, em geral, não excedem 15 mm de diâmetro (OZKUL; KUCUK, 2011; ACI, 2015).

O primeiro método utilizado para a classificação do acabamento superficial era baseado na contagem e medição manual do diâmetro das bolhas de ar, seguido pelo cálculo do percentual de área afetada pelos poros. No entanto, esse procedimento, extremamente laborioso, não refletia a qualidade do acabamento superficial do concreto (THOMPSON, 1969). Uma nova técnica para a avaliação do acabamento superficial foi proposta por Thompson (1969) e consistia na comparação da superfície avaliada com fotos de referência, com diferentes graus de cobertura por bolhas de ar. O *Concrete International Board - CIB* (CIB, 1973) prescreveu uma metodologia similar à proposta por Thompson (1969) para a avaliação do acabamento superficial dos elementos de concreto em termos de bolhas de ar e de variação da coloração. A escala de referência, contudo, é

diferente. A Figura 12 ilustra as fotografias de referência para as classificações propostas por Thompson (1969) e pelo CIB (1973).

Figura 12 – Escalas de referência para avaliação do acabamento superficial: (a) proposta por Thompson (1969); (b) proposta pelo CIB (1973).



Fonte: Thompson (1969); CIB (1973).

A princípio, a comparação entre imagens de referência e a superfície analisada é simples e de fácil aplicação, contudo, algumas críticas foram realizadas, devido à variabilidade entre as diferentes escalas impressas, à subjetividade do olhar humano e, ainda, às diferentes propriedades óticas do concreto e do papel (LEMAIRE; ESCADEILLAS; RINGOT, 2005; OZKUL; KUCUK, 2011).

Com vistas a tornar a avaliação da qualidade superficial mais objetiva, Lemaire, Escadeillas e Ringot (2005) sugeriram o uso de fotografias digitais e de técnicas de processamento para o cálculo da porcentagem de área afetada por poros e da variação de coloração das superfícies de concreto. Desde então, alguns pesquisadores fizeram uso desta e de outras técnicas para avaliar o acabamento superficial de materiais cimentícios.

Ozhul e Kucuk (2011) desenvolveram um aparato que utiliza um diferencial de pressão para a quantificação das bolhas de ar nas superfícies de concreto. Os autores concluíram que o dispositivo proposto é adequado, uma vez que as medições efetuadas se correlacionaram com os resultados obtidos por análise digital de imagens e aqueles utilizando a metodologia proposta pelo CIB (1973).

Silva e Stemberk (2013) combinaram a técnica de análise digital de imagens e lógica *fuzzy* no desenvolvimento de um sistema de classificação da qualidade do acabamento superficial de elementos pré-fabricados de concreto autoadensável. A qualidade das superfícies é dada em função do percentual de área ocupada por bolhas de ar, do tamanho máximo dos poros e da curva de distribuição de tamanho das bolhas.

Mais recentemente, Kwasny *et al.* (2015) e Benito *et al.* (2015) tentaram correlacionar a qualidade do acabamento superficial com os parâmetros reológicos dos materiais cimentícios estudados. Kwasny *et al.* (2015) relataram que o aumento na tensão limite de escoamento gera um maior número de bolhas de ar, sendo esse efeito mais pronunciado em poros com diâmetro menor que 1 mm. Por sua vez, Benito *et al.* (2015) correlacionaram a qualidade do acabamento superficial de corpos de prova de CAA com o parâmetro t_{500} , um ensaio empírico que está relacionado com a viscosidade plástica. Os autores concluíram que o aumento no valor de t_{500} ocasiona maior percentual de poros retidos na superfície dos concretos.

5 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

5.1 Conceituação

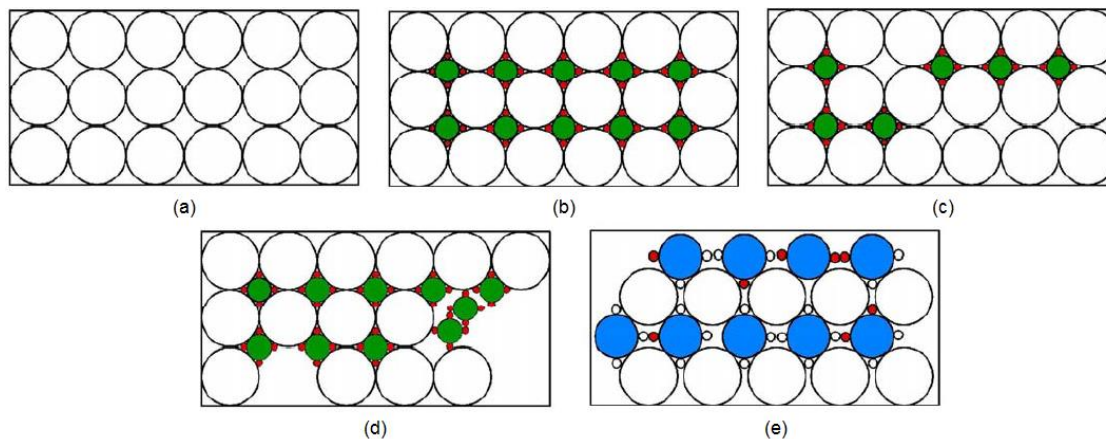
Diversas áreas do conhecimento tem interesse pelos fenômenos de empacotamento de partículas, uma vez que grande parte dos materiais naturais ou industriais são, ou possuem, partículas de diferentes formas e tamanhos. São consideradas partículas os grãos de agregados, minerais, metais, solos, pós químicos (STROEVEN; STROEVEN, 1999; VOGT, 2010; CHATEAU, 2012).

McGeary (1961) definiu o estudo de empacotamento de partículas como o problema da correta seleção da proporção e tamanho adequado dos materiais particulados, de modo que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores, e assim sucessivamente.

Empacotamentos densos são desejáveis na obtenção de concretos, cerâmicas e também na metalurgia do pó, entre outros exemplos. Por outro lado, empacotamentos de baixa densidade são necessários para a produção de revestimentos isolantes térmicos (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

De acordo com Riva (2010) existem dois casos extremos de empacotamento: o monodisperso, que contém partículas de mesmo tamanho e resulta em um estado de densidade mínima; e o polidisperso, no qual há uma distribuição gradual de tamanho das partículas que, em sucessão ideal, possibilita um estado de densidade máxima. A Figura 13 apresenta o efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência do empacotamento.

Figura 13 – Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes e (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.



Fonte: adaptado de Oliveira *et al.*, 2000.

5.2 Fatores que influenciam o empacotamento de partículas

Uma série de fatores pode alterar o empacotamento de um determinado conjunto de partículas: a existência de diversas distribuições granulométricas alterando a condição de dispersão inicial; a morfologia das partículas; o tamanho das partículas; a porosidade interna das partículas etc. (REIS, 2008).

5.2.1 Morfologia, porosidade e densidade das partículas

A morfologia das partículas exerce grande influência nas condições de empacotamento. Quanto menos esférica for a partícula, menor é a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha. Esse fato ocorre devido à fricção interparticular, originada pelo contato das superfícies irregulares das partículas. Esse efeito é mais pronunciado quanto menor forem as partículas irregulares, dado que possuem maior área superficial específica (OLIVEIRA *et al.*, 2000; CHATEAU, 2012).

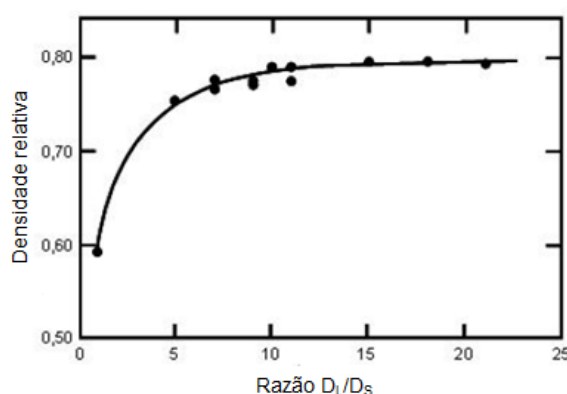
Baixas concentrações de partículas não esféricas não ocasionam redução muito pronunciada na densidade de empacotamento. No entanto, quando se aumenta a concentração de partículas não esféricas a estrutura de empacotamento

é destruída, ocorrendo o aumento na porosidade, o que resulta em diminuição da densidade (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

É muito difícil desenvolver um modelo que possa prever o comportamento de misturas que envolvam partículas não esféricas, em virtude da grande gama de formatos das partículas e da infinidade de combinações entre elas. A única consideração que pode ser feita é que à medida que as partículas tornam-se não esféricas haverá um decréscimo na densidade de empacotamento e propriedades correlatas (CHATEAU, 2012).

Uma maneira de otimizar a densidade de empacotamento em sistemas que contenham partículas não esféricas é através do controle da distribuição granulométrica, pois, conforme ilustrado na Figura 14, a densidade de empacotamento se eleva com o aumento da razão entre os diâmetros das partículas maiores e os das menores.

Figura 14 – Densidade de empacotamento máxima em função da relação entre os tamanhos de partículas para misturas bimodais de partículas minerais irregulares.



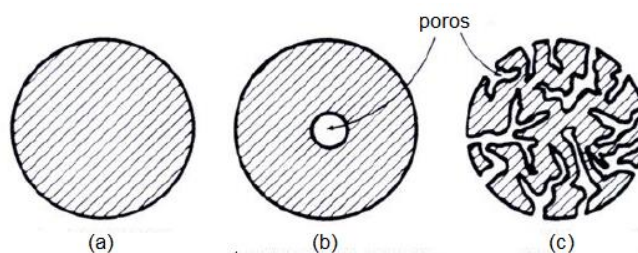
Fonte: Oliveira *et al.*, 2000.

De acordo com Oliveira *et al.* (2000), a porosidade interna das partículas dificulta a obtenção de empacotamentos de alta densidade relativa. Assim, os autores recomendam a utilização de partículas densas e com a menor porosidade possível. Entretanto, as partículas densas não são as mais usuais. As partículas podem ser densas, com porosidade interna fechada ou com porosidade aberta, conforme representado na Figura 15.

A existência de partículas com porosidade aberta provoca alterações no empacotamento das mesmas, dado o seu formato irregular e maior capacidade de

absorção de fases líquidas por meio dos poros. Deste modo, misturas com partículas com porosidade aberta apresentam menor densidade de empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Figura 15 – Representação esquemática da porosidade das partículas: (a) partícula densa; (b) partícula com porosidade fechada e (c) partícula com poros abertos.



Fonte: Oliveira *et al.*, 2000.

No que tange a densidade das partículas, cabe mencionar que, se em uma mistura houver uma diferença acentuada na densidade de seus componentes, deverá ser dada atenção a possível ocorrência de segregação.

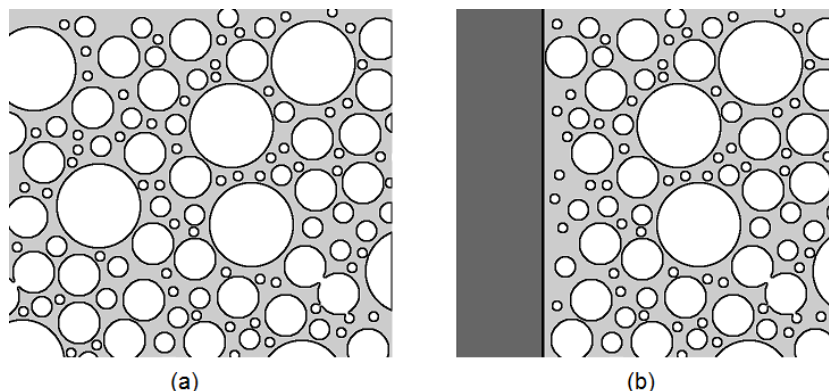
5.2.2 Efeito parede

O efeito parede ocorre quando uma determinada superfície (fôrma, armadura ou agregado graúdo) altera a efetiva distribuição de partículas em seu entorno. Este fenômeno é diretamente responsável pela existência da zona de transição, uma vez que as partículas de agregados interrompem o empacotamento dos grãos de cimento próximos a elas, criando regiões de maior porosidade (SCRIVENER; CRUMBIE; LAUGESSEN, 2004).

Outra decorrência do efeito parede é a camada da “pele” de concreto, que por apresentar menor concentração de agregados graúdos, possui maior porosidade do que a massa interna de concreto. Uma representação esquemática do efeito parede é apresentada na Figura 16.

Ao se trabalhar com empacotamentos contendo partículas pequenas (finas) e maiores (grossas), é possível considerar que há uma superfície de contato praticamente plana entre tais partículas, o que ocasiona o efeito parede (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Figura 16 – Representação do efeito parede: (a) acomodação das partículas caso não houvesse obstáculo; e, (b) camada com menor teor de agregados graúdos no entorno da “parede”.



Fonte: Roussel; Gram, 2014.

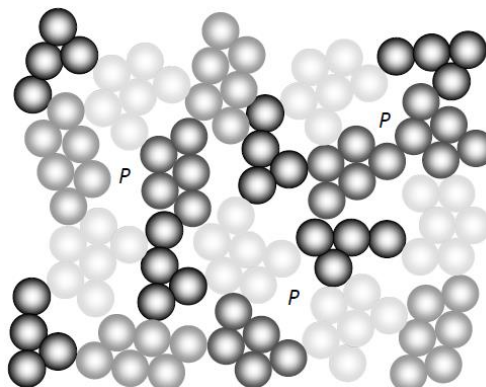
Para minimizar a diminuição da densidade de empacotamento em virtude do efeito parede, Oliveira *et al.* (2000) recomendam que o quociente entre os diâmetros das partículas grossas e finas seja, pelo menos, igual a dez.

5.2.3 Estado de dispersão das partículas

Partículas muito finas podem causar a diminuição da eficiência do empacotamento devido à sua tendência de aglomeração. De modo geral, a aglomeração é mais pronunciada em partículas inferiores a 1 μm , no entanto, partículas maiores também podem apresentar esse comportamento. A aglomeração surge por conta do aumento das forças interparticulares, devido à maior relação entre área superficial e volume apresentado pelas partículas mais finas (OLIVEIRA *et al.*, 2000; CHATEAU, 2012).

Na maioria das vezes é necessário o uso de agentes dispersantes para a neutralização das forças atrativas entre as partículas. Há de se ter atenção que a dispersão inadequada pode alterar a curva de distribuição de partículas originalmente prevista, pois os aglomerados formados elevam o diâmetro das partículas presentes na mistura (OLIVEIRA *et al.*, 2000; FENNIS, 2010). Além do efeito da alteração do diâmetro das partículas, os aglomerados formados equivalem a partículas ocas, que originam áreas de alta porosidade, como pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Representação esquemática do efeito da aglomeração das partículas gerando áreas de alta porosidade, indicadas pela letra P.



Fonte: Fennis, 2010.

5.3 Modelos de empacotamento de partículas

Os modelos de empacotamento de partículas se apresentam por meio de equações matemáticas que prescrevem como partículas de diferentes tamanhos irão interagir geometricamente. Tais modelos calculam a densidade de empacotamento teórica de uma mistura tendo como base a distribuição granulométrica e a densidade de empacotamento entre os grupos de partículas (FENNIS, 2010).

É possível encontrar na literatura uma grande gama de modelos matemáticos de empacotamento de partículas, cada qual com enfoque e aplicação específicos. Cabe menção aos modelos propostos por Aim e Goff (1968), Toufar, Born e Klose (1976), e, mais recentemente, de Larrard (1999). O objetivo desse trabalho não é fazer uma comparação entre esses modelos. Por conta disso, serão abordados somente os aspectos relativos ao método que será utilizado na fase experimental.

Os estudos teóricos e experimentais relacionados ao empacotamento de partículas geram duas abordagens: uma discreta, que considera as partículas individualmente; e, outra contínua, que trata as partículas como distribuições contínuas (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

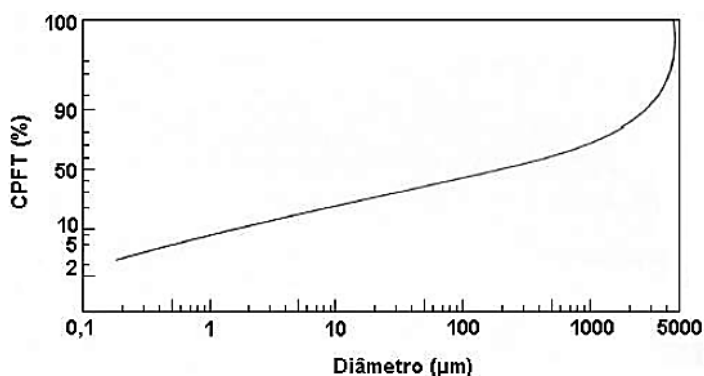
Segundo Funk e Dinger (1994) e Oliveira *et al.* (2000) um exemplo de modelo que trabalha com a abordagem discreta é o proposto por Furnas. Nesse modelo o empacotamento máximo ocorre quando as partículas finas preenchem completamente os vazios existentes entre as maiores.

De acordo com Oliveira *et al.* (2000), Furnas demonstrou que as proporções de vários tamanhos de partículas presentes na elaboração de uma distribuição de máxima densidade de empacotamento formam uma progressão geométrica. O modelo proposto por Furnas é representado na Equação 6.

$$CPFT = \left(\frac{D_p^{\log \bar{r}} - D_S^{\log \bar{r}}}{D_L^{\log \bar{r}} - D_S^{\log \bar{r}}} \right) \times 100 \quad (6)$$

onde CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que 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 \bar{r} é a razão entre o volume de partículas retidas em uma malha de peneira e o volume na malha imediatamente inferior. A representação gráfica do modelo de Furnas é apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Representação gráfica do modelo de empacotamento proposto por Furnas.



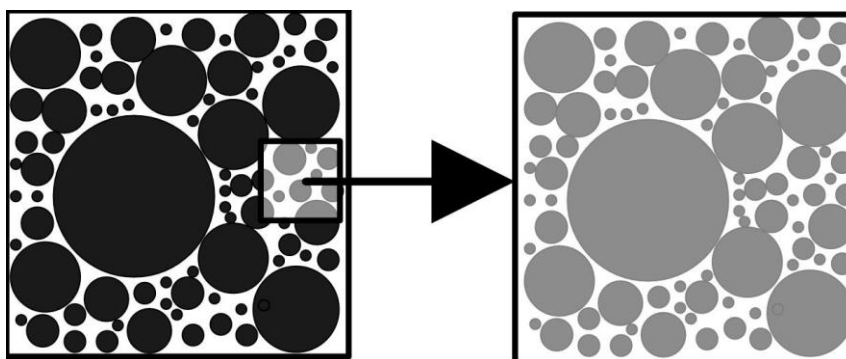
Fonte: Oliveira *et al.*, 2000.

Em distribuições reais de partículas, todos os diâmetros podem estar presentes, de forma que uma teoria de empacotamento de partículas deveria ser concebida considerando as distribuições como contínuas. O modelo proposto por Andreasen parte desse princípio (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Segundo Oliveira *et al.* (2000) e Vogt (2010), o empacotamento ideal foi descrito por Andreasen como aquele em que, em torno de duas partículas específicas de tamanhos muito diferentes, há condições de similaridade, isto é, a “imagem de granulação” em ambas as partículas deve ser a mesma. Isto implica dizer que, a vizinhança de cada uma das partículas, quando devidamente ampliada,

apresenta as mesmas características de todo o sistema de partículas. A Figura 19 ilustra o conceito de imagem de granulação.

Figura 19 – Representação do conceito de imagem de granulação.



Fonte: Vogt, 2010.

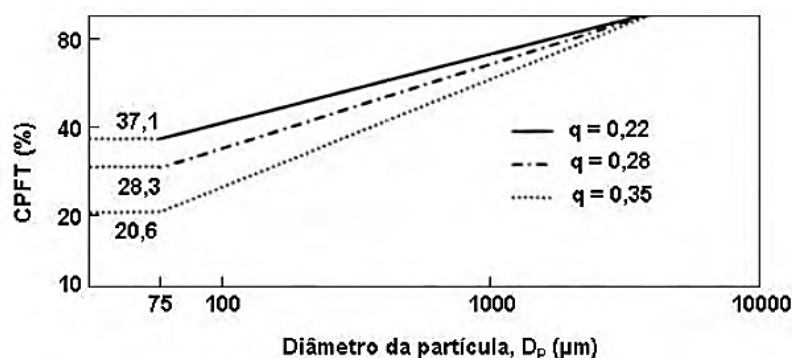
A condição de similaridade proposta por Andreasen pode ser definida por uma distribuição de tamanho de partículas em termos exponenciais, conforme apresentado na Equação 7.

$$CPFT = \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q \times 100 \quad (7)$$

onde CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que D_p , D_p é o diâmetro da partícula, D_L é o diâmetro da maior partícula, e, q é o módulo ou coeficiente de distribuição. Andreasen ainda determinou que o máximo empacotamento ocorreria quando o coeficiente q estivesse no intervalo 0,33-0,50 (FUNK;DINGER, 1994; OLIVEIRA *et al.*, 2000; VOGT, 2010). Posteriormente, Funk e Dinger (1994) demonstraram, por meio de simulações computacionais, que o expoente que propicia a máxima densidade de empacotamento é igual a 0,37. A representação gráfica do modelo de Andreasen é apresentada na Figura 20.

Oliveira *et al.* (2000) ressaltam que a distribuição de Andreasen com coeficiente q igual a 0,37 propicia o máximo empacotamento teórico, mas, para que isso aconteça, o diâmetro da menor partícula (D_S) tem que ser zero, o que, na realidade não se verifica ($D_S > 0$). Deste modo, para sistemas reais, deve-se utilizar o menor valor possível de D_S .

Figura 20 – Representação gráfica do modelo de Andreasen, para diferentes valores de q .



Fonte: Oliveira *et al.*, 2000.

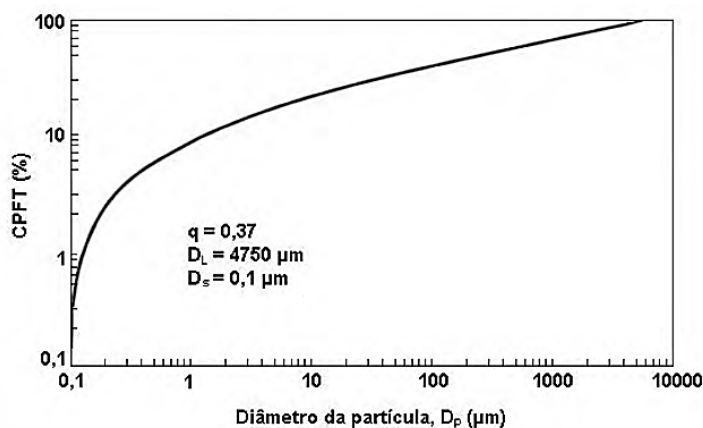
Funk e Dinger (1994), após extensa análise dos modelos propostos por Furnas e por Andreasen, concluíram que: a quantidade de partículas finas de diâmetros distintos adicionada para construir a distribuição granulométrica, segundo o modelo de Furnas, forma uma progressão geométrica; a distribuição de Andreasen, quando representada graficamente em uma escala log-log é uma reta, indicando também, uma progressão geométrica. A partir dessa análise, os autores provaram que os modelos de Furnas e Andreasen convergem matematicamente para a seguinte equação:

$$CPFT = \left(\frac{D_p^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \times 100 \quad (8)$$

em que CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que 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 q é o módulo ou coeficiente de distribuição.

A Equação 8 é conhecida por modelo de Alfred ou de Andreasen modificado. A equação proposta por Funk e Dinger (1994) mostra que os modelos de Furnas e Andreasen podem ser considerados como duas formas distintas de se expressar a mesma coisa. O modelo de Alfred consiste em um aperfeiçoamento dos modelos de Furnas (revisão matemática) e de Andreasen (inclusão do conceito de tamanho mínimo de partícula). A representação gráfica do modelo de Alfred é ilustrada na Figura 21.

Figura 21 – Representação gráfica do modelo de empacotamento de Alfred.



Fonte: Oliveira *et al.*, 2000.

De mesmo modo que no modelo de Andreasen, a máxima densidade de empacotamento no modelo de Alfred é alcançada quando o coeficiente q vale 0,37, no entanto, D_s não será zero, mas sim, o diâmetro da menor partícula do sistema (FUNK; DINGER, 1994; OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Há diferenças consideráveis entre os modelos de empacotamento apresentados nessa seção, contudo, um estudo comparativo entre eles não faz parte do escopo deste trabalho. Deste modo, o modelo utilizado nessa pesquisa foi o de Alfred. A escolha deste modelo se justifica pelo fato de ser mais condizente com sistemas particulados reais e por propiciar a máxima densidade de empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

5.4 Aplicabilidade do empacotamento de partículas em materiais cimentícios

Segundo Castro e Pandolfelli (2009), o primeiro tratado sobre o empacotamento de partículas em concreto foi publicado em 1892, por Féret, que apresentou a possibilidade da seleção de tipos adequados de agregados e a relação entre a porosidade do material quando no estado endurecido e sua resistência à compressão, quando submetidos ao processo de cura úmida. Segundo o autor, a resistência máxima é obtida quando a porosidade inicial da matriz é mínima, isto é, a densidade de empacotamento é máxima.

Uma das formas de se determinar o melhor empacotamento de partículas é o estabelecimento de curvas granulométricas ideais por meio dos modelos de empacotamento. Tendo-se uma curva destas, basta buscar uma combinação entre as partículas disponíveis de forma a se aproximar o máximo possível desta curva ideal. Para isso, técnicas simples de otimização computacional podem ser utilizadas (REBMANN, 2011).

Concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas, quando comparados com os concretos dosados por outros métodos, apresentam propriedades superiores. No estado fresco apresentam-se trabalháveis por um período de tempo maior, sem a necessidade da incorporação de aditivos retardadores de pega, e no estado endurecido esses concretos possuem maior resistência mecânica aos 28 dias de idade (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2009).

A distribuição granulométrica e o empacotamento de partículas exercem grande influência no comportamento reológico dos materiais cimentícios. A fluidez do concreto depende da distribuição granulométrica, do índice de forma e da textura superficial das partículas. Assim, a distribuição de tamanho de partículas é de grande importância para promover o empacotamento e, juntamente com o fluido, define as propriedades reológicas do material no estado fresco (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Nesse sentido, Oliveira *et al.* (2000) argumentam que em suspensões contendo partículas finas e grossas, como o caso dos concretos, o coeficiente de distribuição q igual a 0,37 não proporciona a máxima fluidez do sistema, dado que os agregados encontram-se muito próximos e a interferência entre eles é elevada, pois dispõe de pouca matriz para seu afastamento. O aumento na fluidez pode ser alcançado com a diminuição do coeficiente q , sendo que valores de q próximos a 0,20 propiciam maior fluidez para a faixa granulométrica que vai de 0,1 a 4750 μm . Entretanto, quando o coeficiente q é inferior a 0,20 a fluidez pode ser prejudicada devido ao incremento excessivo na área superficial ocasionado pelo alto teor de partículas finas.

De acordo com Vanderlei (2004) e Vogt (2010), para que os concretos apresentem boa capacidade de escoamento recomenda-se que o valor do coeficiente de distribuição seja inferior a 0,30. Valores de q próximos a 0,30 devem

ser considerados para misturas adensadas sobre vibração. Valores de q entre 0,20-0,25 conduzem a misturas autoadensáveis.

A utilização do conceito de empacotamento de partículas para a dosagem de concretos ainda é pouco difundida entre a maioria dos engenheiros atuantes na construção civil, principalmente no Brasil. Desta forma, a aplicação desse conceito na tecnologia do concreto resulta em um novo processo de dosagem, podendo vir a ser uma alternativa muito eficiente em comparação aos métodos existentes (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

O conceito de empacotamento de partículas tem sido empregado para obtenção de misturas de alto e ultra-alto desempenho e também com vistas a promover a diminuição do consumo de ligante (cimento). A seguir são exemplificados sucintamente alguns trabalhos que utilizaram o conceito de empacotamento de partículas, em especial o modelo de Alfred, na dosagem dos materiais cimentícios.

Castro, Liborio e Pandolfelli (2009) estudaram três composições de concreto de alto desempenho. A primeira delas foi dosada com base no estudo da pasta de cimento (compatibilidade dos aglomerantes e determinação do ponto de saturação do aditivo) e otimização do esqueleto granular (obtenção da maior massa unitária no estado compactado na combinação de dois agregados com distribuições granulométricas distintas) e foi a referência adotada no estudo. As demais misturas foram obtidas por meio do modelo de Alfred, utilizando-se os coeficientes de distribuição q igual a 0,21 e 0,26. Ao comparar o desempenho mecânico aos 28 dias dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas com o de referência, os autores verificaram aumento superior a 40% na resistência à compressão, incremento de 117% na resistência à tração por compressão diametral e acréscimo de aproximadamente 50% na resistência à tração na flexão.

Pereira (2010) utilizando o modelo de Alfred produziu misturas de concreto autoadensável com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência. O autor obteve resistências à compressão variando de 65-70 MPa aos 28 dias, para um consumo de cimento de 325 kg/m³ e de adições reativas (sílica e metacaulinita) de 33 kg/m³. Foi observado também que a absorção de água por imersão nesses concretos foi muito baixa, em média 1,32%, o volume de vazios foi 3,13% e a absorção por capilaridade foi de 0,23 g/cm², fatores estes que indicam um bom comportamento com relação à durabilidade desses concretos.

Fennis (2010), com objetivo de produzir concretos eco-eficientes com baixo consumo de ligante (menor do que 260 kg/m^3) e resistência à compressão que atendesse a classe C20/25, utilizou o método de Alfred para otimização das misturas. A autora produziu concretos com consumo de cimento igual a 110 kg/m^3 , por meio da substituição desse ligante por cinza volante e pó de quartzo. As propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos eco-eficientes aos 28 dias foram similares às do concreto de referência (que empregou 260 kg/m^3 de cimento).

Rebmann (2011) comparou o desempenho de concretos com baixo teor de cimento (consumo variando de 199 a 279 kg/m^3) com concretos dosados para atender ao consumo mínimo de cimento e a máxima relação a/c estabelecidos pela NBR 12655:2015 (ABNT, 2015) para a classe de agressividade IV. O método de empacotamento empregado foi o de misturas sucessivas, ou seja, diversas combinações de agregados de diferentes granulometrias e em proporções distintas, a fim de obter o menor volume de vazios, na dosagem dos concretos com baixo consumo de ligante. Para os demais concretos, o objetivo foi obter resistência à compressão mínima de 40 MPa aos 28 dias. Os incrementos na resistência à compressão nos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas variaram de 15 a 85%, aos 28 dias, quando comparados aos concretos que não utilizaram esse conceito para sua dosagem. Além disso, o consumo de cimento nos concretos com baixo teor de ligante foi de 52 a 114% menor do que nos outros concretos estudados por este autor.

Oliveira (2013) comparou o desempenho mecânico e reológico de concretos de alto desempenho, sendo um deles dosado com base na reologia da pasta e da argamassa e o outro com auxílio do modelo de Alfred. O concreto dosado com base no conceito de empacotamento de partículas apresentou incremento de 14,7% na resistência à compressão aos 28 dias e redução de 22,4% no consumo de cimento.

Recentemente, o trabalho de Campos, Marques Filho e Klein (2016) apresentou uma revisão de literatura sobre diversos métodos e modelos para aplicação do conceito de empacotamento de partículas em materiais cimentícios. Os autores ainda destacaram que os modelos de empacotamento de partículas podem ser utilizados para a otimização da graduação das partículas, permitindo a minimização do volume de vazios do sistema, diminuindo, assim, o teor de aglomerante requerido.

Portanto, fica constatado que a aplicação de técnicas de empacotamento de partículas na dosagem do concreto contribuem para a melhoria do esqueleto granular e otimização da matriz cimentícia, garantindo melhor trabalhabilidade, desempenho mecânico e durabilidade.

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

6.1 Metodologia de caracterização dos materiais

As propriedades dos materiais utilizados nesta pesquisa foram determinadas conforme as disposições normativas existentes, e, na ausência de normas específicas para determinados métodos de ensaio, foram aplicados procedimentos comprovadamente eficazes, segundo a literatura especializada.

6.1.1 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho foi caracterizado quanto à massa específica, de acordo com o procedimento previsto na NBR NM 23:2001 (ABNT, 2001a). A distribuição granulométrica foi determinada por ensaio de granulometria por espalhamento de luz, com o equipamento Mastersizer-S, modelo LongBench-MAM 5005.

6.1.2 Adições minerais

As adições minerais utilizadas foram caracterizadas quanto à massa específica, conforme procedimento da NBR NM 23:2001 (ABNT, 2001a). A distribuição granulométrica foi avaliada por meio de ensaio de granulometria por espalhamento de luz, com o equipamento Mastersizer-S, modelo LongBench-MAM 5005 no caso da sílica ativa, e por ensaio de sedimentação, conforme prescrito na NBR 7181:2016 (ABNT, 2016) para o pó de quartzo.

6.1.3 Agregados naturais

A caracterização física dos agregados naturais foi efetuada conforme os procedimentos de ensaio apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Ensaio de caracterização dos agregados.

Propriedade	Referência normativa	
	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Distribuição granulométrica	NM 248:2003	NM 248:2003
Módulo de finura	NM 248:2003	NM 248:2003
Massa específica	NM 52:2009	NM 53:2009
Massa unitária e índice de vazios	NM 45:2002	NM 45:2002
Absorção de água	NM 30:2001	NM 53:2009
Teor de pulverulentos	NM 46:2003	NM 46:2003
Impurezas orgânicas	NM 49:2001	Não se aplica

6.1.4 Agregados reciclados

Os agregados reciclados foram submetidos aos mesmos ensaios de caracterização realizados para os agregados naturais, apresentados na Tabela 13, tendo em vista a ausência de documentação normativa que determine métodos de ensaio específicos para agregados reciclados de RCD.

Além da caracterização física, os agregados reciclados foram submetidos ao ensaio de lixiviação a fim de avaliar se havia contaminação por metais pesados. Os extratos lixiviados das amostras de agregados reciclados foram obtidos por meio do procedimento descrito na NBR 10005:2004 (ABNT, 2004b). A quantificação dos metais presentes nos extratos lixiviados se deu por espectrometria de emissão atômica (para o elemento mercúrio) e por espectrometria de absorção atômica por plasma acoplado indutivamente (demais elementos). Todos os ensaios de lixiviação foram realizados pelo laboratório da Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP).

6.1.5 Aditivo químico

O aditivo utilizado nessa pesquisa foi um superplastificante à base de policarboxilatos, com alto poder de redução de água e isento de cloretos. O mesmo atende às especificações da NBR 11768:2011 (ABNT, 2011b), sendo classificado como aditivo SP II/N/A/R.

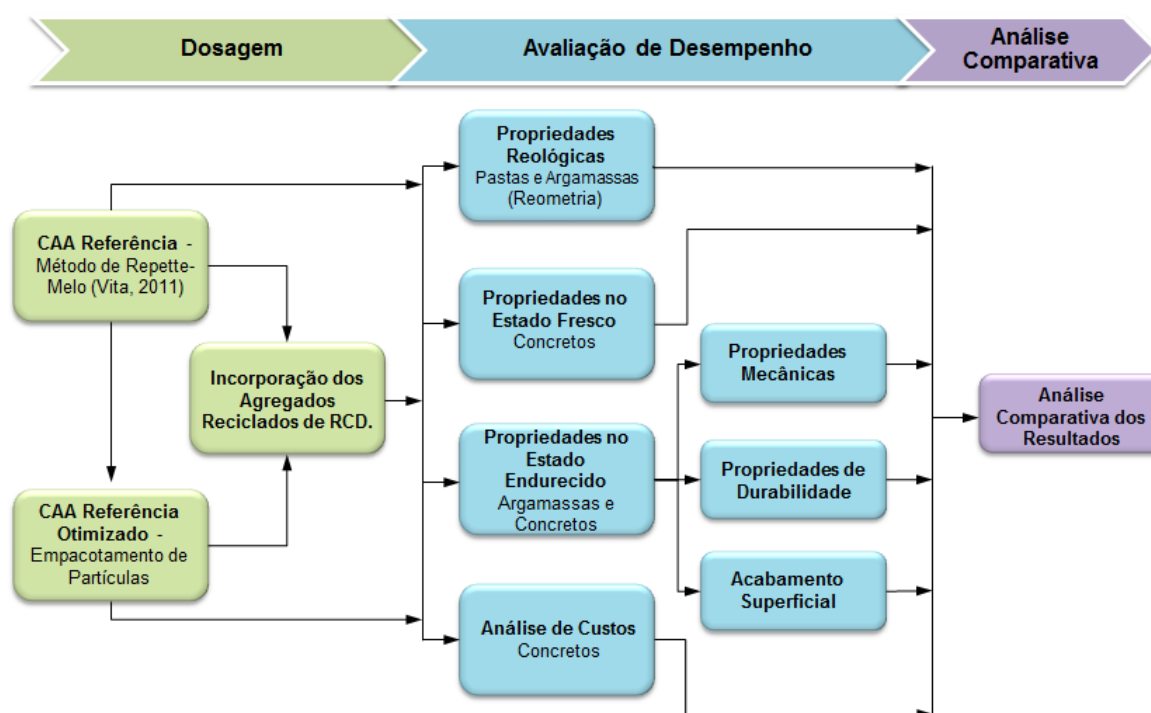
6.1.6 Água

A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Campinas/SP. Esta água é considerada adequada para o uso em concretos e não necessita ser ensaiada, conforme prescrições da NBR 15900-1:2009 (ABNT, 2009d).

6.2 Metodologia experimental

A metodologia experimental empregada no presente trabalho pode ser sintetizada conforme se expõe na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma das macroetapas da metodologia experimental.



A seguir são melhor detalhadas as etapas do programa experimental.

6.2.1 Dosagem

A dosagem do CAA de referência (CAA-REF), formulado exclusivamente com agregados naturais, foi uma reprodução do traço estabelecido por Vita (2011). Tal composição foi determinada através do método de Repette-Melo (MELO, 2005), já detalhado no item 3.4.4 deste trabalho.

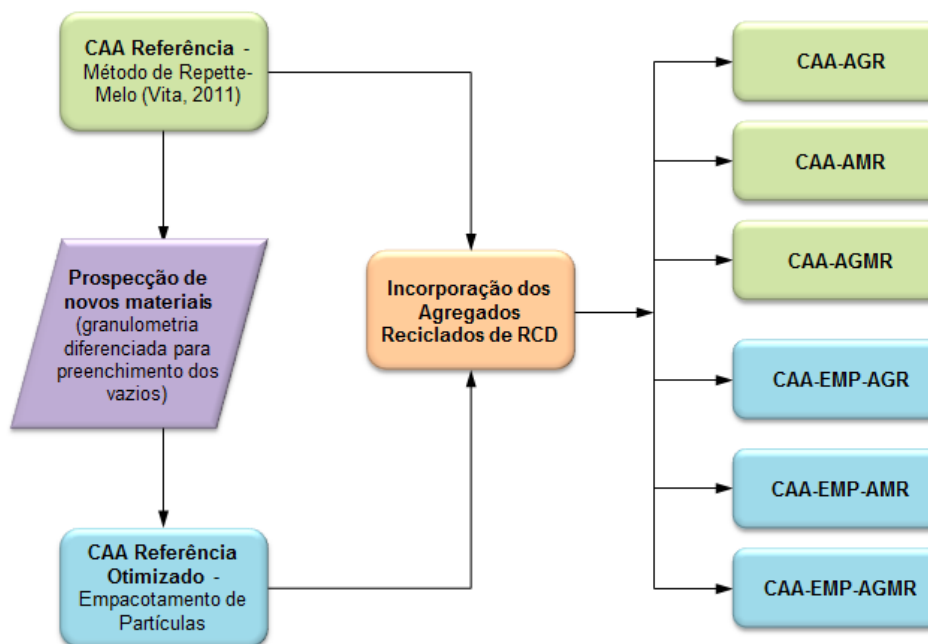
A partir da dosagem do concreto de referência foram estabelecidas três novas misturas: a primeira na qual houve substituição de 20% do agregado graúdo natural por brita reciclada, que é identificada por CAA-AGR; a segunda, em que se substituiu 20% da areia natural por agregado miúdo reciclado, a qual é referida como CAA-AMR; e, por fim, a terceira composição em que foram substituídas 20% de ambas as frações de agregados naturais (areia e brita) por agregados reciclados, sendo esta mistura chamada de CAA-AGMR.

Posteriormente, foi empregado o conceito de empacotamento de partículas para a otimização das misturas. O modelo de empacotamento empregado neste trabalho foi o de Alfred, por possuir maior eficiência de empacotamento, conforme já explicitado no item 5.3 deste trabalho. Desta forma, foram estabelecidas uma composição de referência aprimorada – CAA-EMP-REF, produzida somente com agregados naturais, e também, mais três misturas, que empregaram agregados miúdos e/ou graúdos, no teor de 20%, em massa, em substituição aos respectivos agregados naturais, sendo identificadas como CAA-EMP-AMR, CAA-EMP-AGR e CAA-EMP-AGMR.

As dosagens das argamassas e pastas foram obtidas em função dos traços estabelecidos para os concretos, preservando as proporções entre os materiais.

O fluxograma do processo de dosagem empregado encontra-se representado na Figura 23.

Figura 23 – Representação esquemática do procedimento de dosagem dos concretos.



6.2.1.1 Procedimentos de mistura

O procedimento de mistura adotado para a produção do CAA consiste na sequência exposta a seguir, o qual é recomendado por Vita (2011):

- a) umedecer a betoneira;
- b) adicionar o agregado graúdo, o agregado miúdo e a metade da água de amassamento e misturar por 1 minuto;
- c) adicionar o cimento, a sílica ativa e o restante da água e misturar por 3 minutos;
- d) interromper o processo por 3 minutos para o repouso do concreto e, durante este tempo, realizar a limpeza dos materiais acumulados nas pás e nas paredes da betoneira;
- e) ligar a betoneira, incorporar o aditivo superplastificante e misturar por mais 5 minutos.

Deste modo, o tempo total de mistura estabelecido para a produção dos concretos foi igual a 12 minutos.

O procedimento de mistura das argamassas é exposto a seguir (VITA, 2011):

- a) umedecer a cuba da argamassadeira;

- b) adicionar o agregado miúdo e a metade da água, e misturar por 0,5 minuto na velocidade baixa e 0,5 minuto na velocidade alta;
- c) adicionar o cimento, a sílica ativa e o restante da água, e misturar por 0,5 minuto na velocidade baixa e 2,5 minutos na velocidade alta;
- d) interromper o processo por 3 minutos para o repouso da argamassa, e durante este tempo realizar a limpeza dos materiais acumulados na pá e nas paredes da cuba;
- e) ligar a argamassadeira por 1 minuto na velocidade baixa e incorporar o aditivo superplastificante à mistura;
- f) misturar por mais 5 minutos em velocidade alta.

Portanto, o tempo total de produção das argamassas foi igual a 13 minutos.

As pastas, por sua vez, foram misturadas conforme a sequência abaixo (VITA, 2011):

- a) umedecer a cuba da argamassadeira;
- b) adicionar o cimento, a sílica ativa e a água e misturar por 0,5 minuto na velocidade baixa e 2,5 minutos na velocidade alta;
- c) interromper o processo por 3 minutos para o repouso da pasta, e durante este tempo realizar a limpeza dos materiais acumulados na pá e nas paredes da cuba;
- d) ligar a argamassadeira por 1 minuto na velocidade baixa e incorporar o aditivo à mistura;
- e) misturar por mais 5 minutos, em velocidade alta.

Desta maneira, o tempo total de mistura das pasta de cimento foi de 12 minutos.

6.2.2 Métodos de ensaio e avaliação de desempenho

O desempenho dos materiais cimentícios produzidos foi avaliado sob três óticas distintas: comportamento reológico; desempenho no estado endurecido e viabilidade econômica. A seguir são detalhados os modos pelos quais foram avaliados as pastas, argamassas e concretos produzidos.

6.2.2.1 Análise reológica

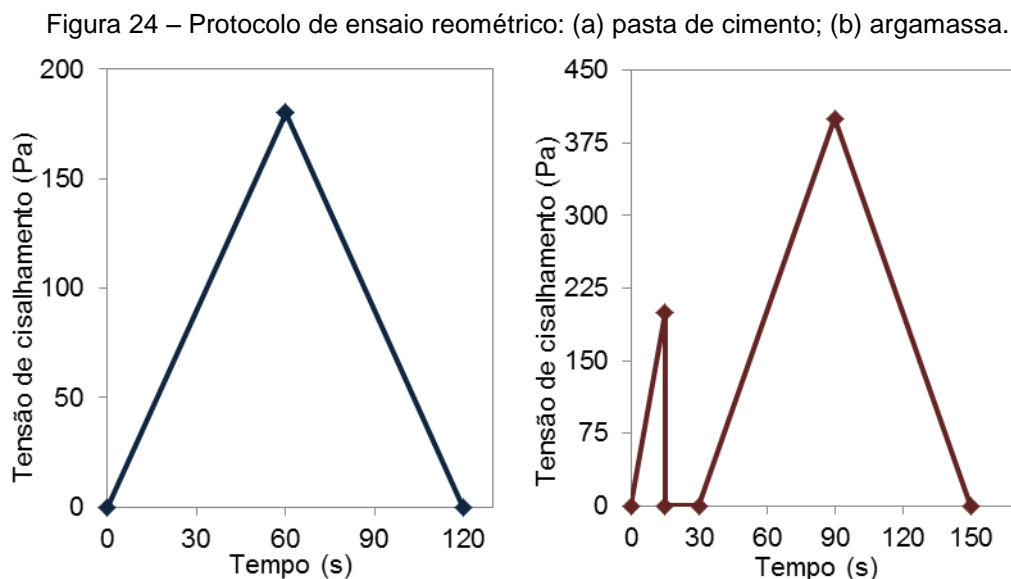
As pastas de cimento e argamassas que constituem os concretos produzidos foram alvo de análise reológica por meio do uso de reometria rotacional. O reômetro utilizado nesse trabalho é do modelo *R/S Rheometer*, da fabricante *Brookfield Engineering Laboratories, Inc.*, disponível no Grupo de Pesquisa Reologia dos Materiais Viscosos e Viscoelásticos (RMVP), do Departamento de Engenharia Civil da UNESP - Campus de Ilha Solteira.

Para as pastas de cimento foi utilizada a geometria de cilindros coaxiais, com controle da tensão de cisalhamento, sendo utilizado o *spindle* CC45. A faixa de trabalho para esta configuração varia de 0 até 195,8 Pa para tensão de cisalhamento, sendo capaz de medir as taxas de deformação de 0 a 1291 s⁻¹ e viscosidade no intervalo de 0,02 a 150 Pa.s. Tal escolha está fundamentada nos trabalhos de Vita (2011), Girotto (2012) e Oliveira (2013), que também fizeram uso do mesmo equipamento. As propriedades reológicas das pastas foram avaliadas ao longo do tempo, sendo feitas determinações 5, 15 e 30 minutos após a incorporação do aditivo superplastificante à mistura.

O sistema de palhetas Vane foi utilizado para a avaliação reométrica das argamassas. A palheta utilizada foi a 40/20, que é capaz de aplicar tensões de cisalhamento que variam de 0 até 1706 Pa e medir taxas de deformação de até 235,5 s⁻¹. As propriedades reológicas das argamassas também foram avaliadas ao longo do tempo, decorridos 5, 30 e 60 minutos após a incorporação do aditivo superplastificante à mistura. O procedimento aqui empregado é o mesmo utilizado por Vita (2011), Girotto (2012) e Oliveira (2013).

Foram empregados protocolos de ensaio distintos para a caracterização reológica das pastas e das argamassas. Para as pastas de cimento foi utilizado um ciclo de cisalhamento em duas etapas: a primeira, ascendente, com aplicação de tensões de cisalhamento de 0 a 180 Pa, por 60 s; a segunda, descendente, onde as tensões aplicadas variaram de 180 a 0 Pa, no período de 60 s. O ciclo de cisalhamento das argamassas foi composto de três etapas: a primeira, de pré-cisalhamento ou homogeneização, com aplicação de tensões de cisalhamento de 0 a 200 Pa, por 15 s, seguida por um repouso de 15 s; a segunda, ascendente, na qual as tensões aplicadas foram de 0 a 400 Pa, em 60 s; e, por fim, a etapa

descendente, onde as tensões decresceram de 400 a 0 Pa, no período de 60 s. Os protocolos de ensaio empregados são ilustrados na Figura 24.



Cabe destacar que a determinação das propriedades reológicas das pastas de cimento e das argamassas se deu nos trechos descendentes dos ciclos de cisalhamento. Kwan e Li (2012) destacaram que a medição dos parâmetros reológicos deve ser efetuada na etapa decrescente do ciclo de cisalhamento, uma vez que nesse momento os materiais ensaiados apresentam o mesmo histórico de cisalhamento, além de serem obtidos resultados mais consistentes e reproduzíveis.

Além dos testes reométricos foram realizados ensaios de mini-espalhamento e mini-funil V, conforme proposto por Okamura e Ouchi (2003), para as argamassas, com o intuito de verificar se há correlação entre os resultados dos ensaios empíricos com os parâmetros reológicos desses materiais cimentícios. Por fim, é importante salientar que todos os ensaios de caracterização reológica foram executados em ambiente climatizado, com temperatura entre $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar entre $55\pm 5\%$.

6.2.2.2 Ensaios no estado fresco

A avaliação de desempenho no estado fresco dos concretos se deu por meio da realização dos ensaios de espalhamento, funil V, caixa L e coluna de segregação. Estes métodos de ensaio são normalizados pela NBR 15823-1:2010

(ABNT, 2010a) e encontram-se descritos nos itens 3.5.1, 3.5.2, 3.5.3 e 3.5.4 do presente trabalho.

6.2.2.3 Ensaaios no estado endurecido

A avaliação do desempenho das argamassas e concretos no estado endurecido pode ser dividida em três grupos: propriedades mecânicas, índices físicos e acabamento superficial.

6.2.2.3.1 Propriedades mecânicas

O desempenho mecânico das diversas composições foi analisado por meio da realização dos ensaios de resistência à compressão axial, de resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. A avaliação da resistência à compressão axial foi feita conforme dispõe a NBR 5739:2007 (ABNT, 2007), aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade. A resistência à tração por compressão diametral dos concretos foi avaliada aos 7 e 28 dias de idade, e de acordo com o procedimento estabelecido pela NBR 7222:2011 (ABNT, 2011a). O módulo de elasticidade foi medido aos 28 dias de idade, seguindo as recomendações da NBR 8522:2008 (ABNT, 2008).

Todos os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. O equipamento de ensaio consiste em uma prensa universal, com capacidade de carga de 200 tf. A velocidade de carregamento é dada em função do ensaio executado, sendo $0,45 \pm 0,15$ MPa/s para a avaliação da resistência à compressão e $0,05 \pm 0,02$ MPa/s para a resistência à tração por compressão diametral. Foram ensaiados seis corpos de prova por idade para a avaliação de cada parâmetro.

6.2.2.3.2 Índices físicos

Foram avaliados a absorção de água por imersão, o índice de vazios e a massa específica dos concretos por meio do procedimento previsto na NBR 9778:2005 (ABNT, 2005), e a absorção de água por capilaridade conforme a NBR

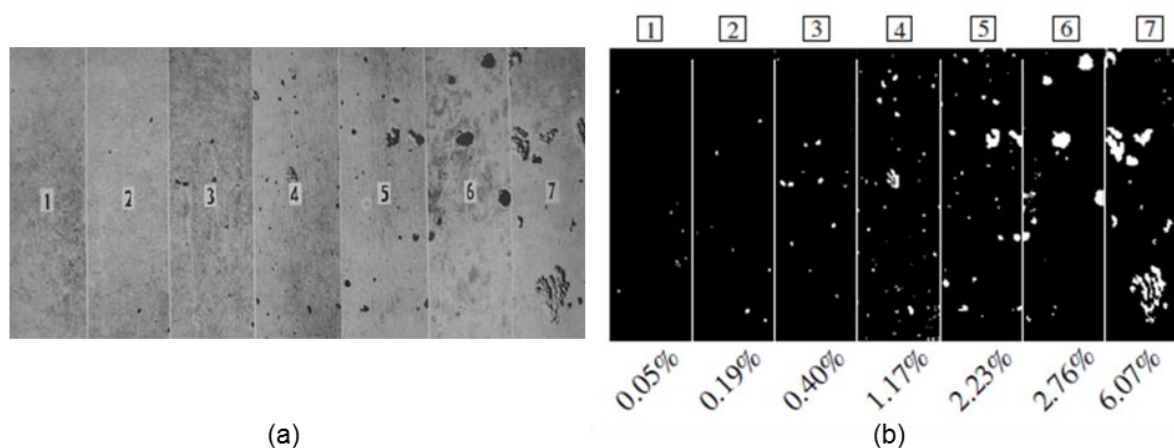
9779:2012 (ABNT, 2012). Todos os ensaios acima mencionados foram realizados aos 28 dias de idade, sendo utilizados quatro corpos de prova para a avaliação de cada propriedade.

6.2.2.3.3 Acabamento superficial

O acabamento superficial dos materiais cimentícios produzidos foi determinado de acordo com duas metodologias: análise visual comparativa, conforme o procedimento prescrito no relatório “*Tolerances on blemishes of concrete*” (CIB, 1973) e adaptado por Silva e Stemberk (2013); e, análise digital de imagens, para a contabilização da área afetada por bolhas de ar e imperfeições nos concretos e argamassas produzidos.

A avaliação do acabamento superficial segundo o método proposto pelo CIB (1973) consiste na comparação da superfície analisada com dois padrões: um para bolhas de ar e outro para tonalidade, que possuem escalas variando de 1 a 7. No presente trabalho, a variação tonal não foi determinada. A escala de avaliação utilizada é ilustrada na Figura 25.

Figura 25 – Escalas para avaliação do acabamento superficial: (a) proposta pelo CIB (1973) e (b) adaptada por Silva e Stemberk (2013).

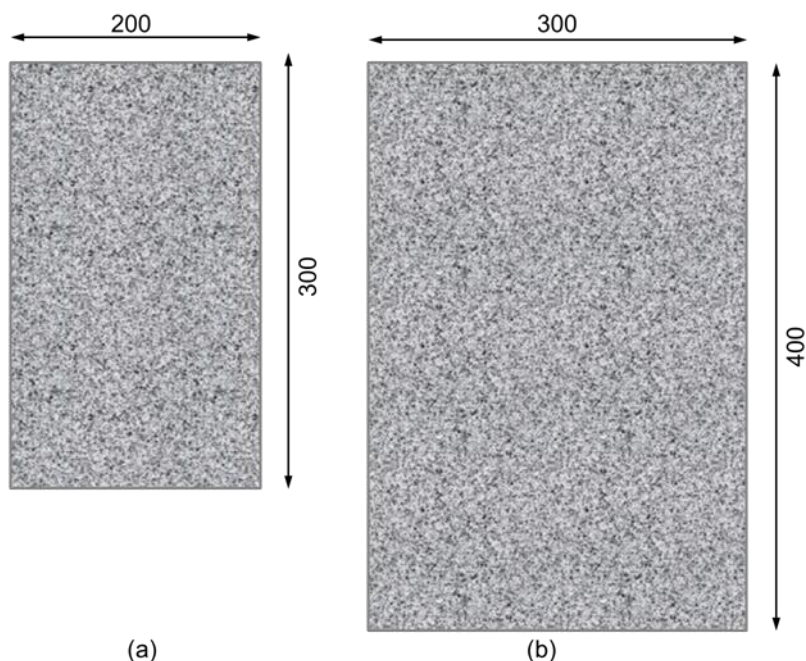


Fonte: adaptado de CIB, 1973 e Silva e Stemberk, 2013.

As técnicas de processamento digital de imagens, por sua vez, permitem a avaliação do acabamento superficial de modo quantitativo. Para a avaliação do acabamento superficial foram confeccionadas placas de dimensões 200 x 300 x 40 mm (comprimento x altura x espessura), para argamassas, e, 300 x 400 x 60 mm,

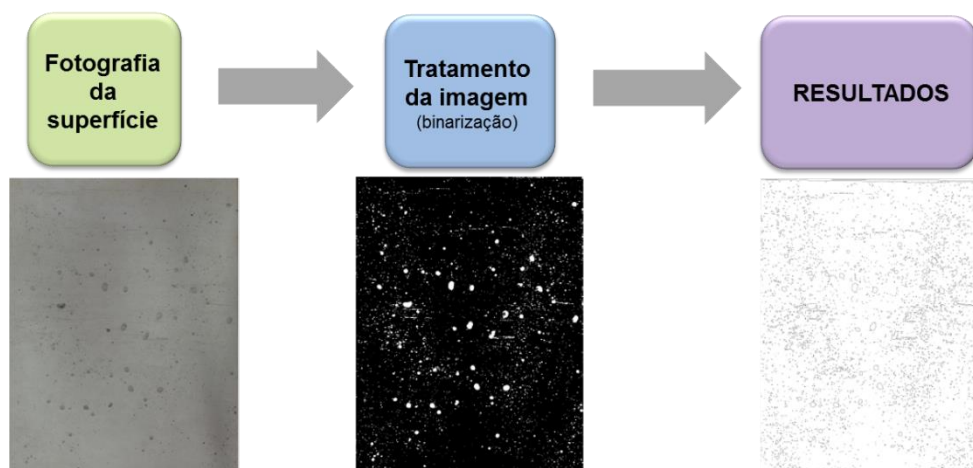
para os concretos. A Figura 26 ilustra a representação esquemática das placas de concreto e argamassa que foram produzidas.

Figura 26 – Representação esquemática das placas: (a) argamassa e (b) concreto.



Após a moldagem e cura das placas, as mesmas foram fotografadas para análise da qualidade do acabamento superficial, sendo utilizado o *software ImajeJ* para o tratamento digital das imagens. Benito *et al.* (2015) também utilizaram este *software* para a avaliação do acabamento superficial de materiais cimentícios. O procedimento empregado para a análise digital das imagens é sintetizado na Figura 27.

Figura 27 – Etapas do processamento digital de imagens.



Cabe salientar que um dos objetivos desse estudo foi verificar se há alguma correlação entre a qualidade de acabamento superficial com os parâmetros reológicos dos concretos e das argamassas. Para tanto, foram moldadas três placas para cada composição de argamassa ou concreto, em diferentes tempos após a incorporação do aditivo superplastificante (5, 30 e 60 minutos). Em simultâneo, foram realizados os ensaios normativos para o concreto fresco (espalhamento, t_{500} , funil V e caixa L), e para a argamassa (reometria rotacional, mini-espalhamento e mini-funil V). Deste modo, foi possível avaliar se a evolução dos parâmetros reológicos interfere na qualidade do acabamento das peças. Além disso, foi possível verificar qual parâmetro (tensão de escoamento ou viscosidade) é mais influente para o acabamento superficial dos materiais cimentícios.

6.2.3 Análise de custos

Foram determinados os custos das composições de concreto estudadas a fim de verificar se a aplicação do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos é viável economicamente, quando comparado aos concretos dosados pelo método de Repette-Melo, que se baseia no estudo reológico das fases pasta e argamassa. A viabilidade econômica dos concretos produzidos foi avaliada em termos de análise de custos dos materiais (R\$/m³) e de eficiência do traço (custo por MPa de resistência à compressão obtido).

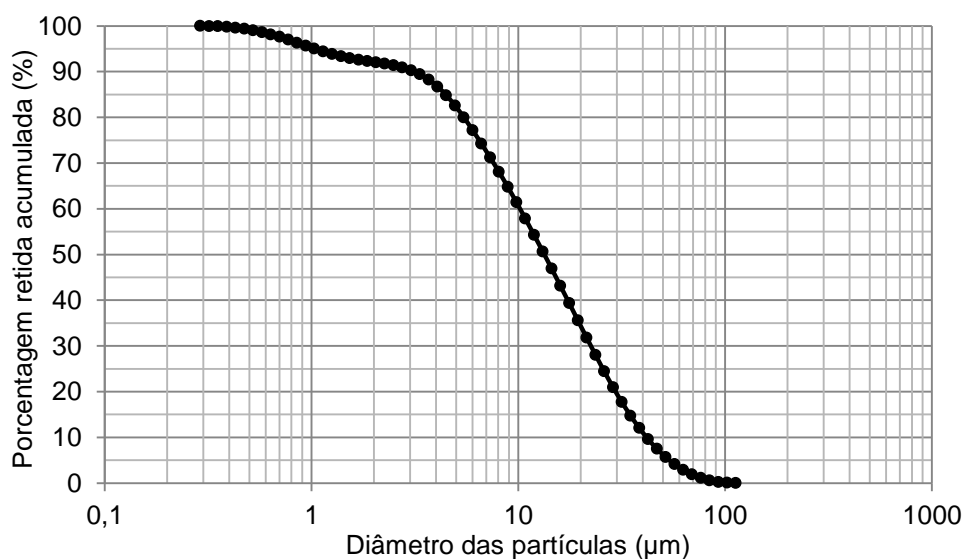
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Caracterização dos materiais

7.1.1 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho foi o CP II E 32, que contém entre 6-34% de escória de alto forno em sua composição, de acordo com a NBR 11578:1991 (ABNT, 1997). A massa específica apresentada pelo cimento foi igual a $3,134 \text{ g/cm}^3$. A distribuição granulométrica é apresentada na Figura 28. O diâmetro médio apresentado pelas partículas foi de $13,37 \mu\text{m}$.

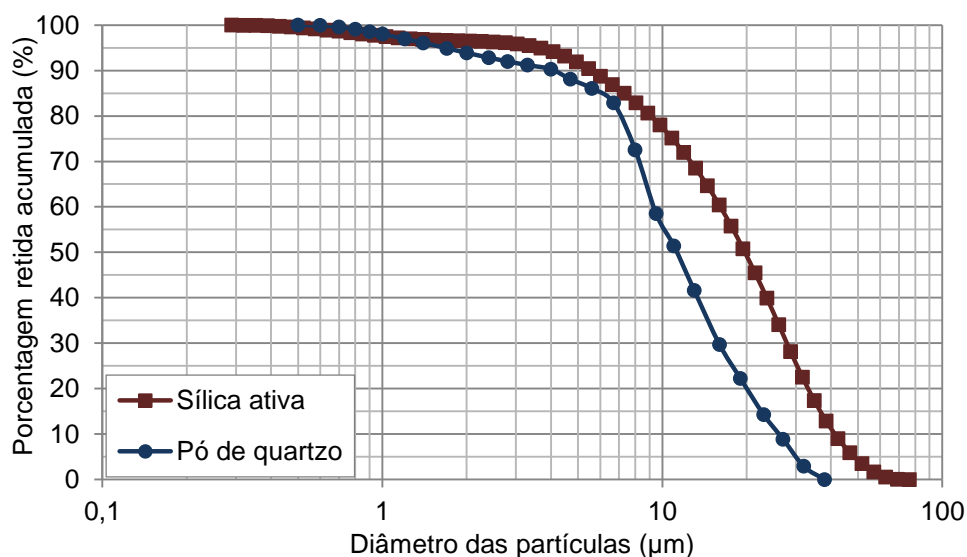
Figura 28 – Distribuição granulométrica do cimento.



7.1.2 Adições minerais

As adições minerais utilizadas neste trabalho foram a sílica ativa e o pó de quartzo. A sílica ativa apresentou massa específica igual a $2,192 \text{ g/cm}^3$ e diâmetro médio de partícula de $19,72 \mu\text{m}$, ao passo que a massa específica do pó de quartzo foi de $2,776 \text{ g/cm}^3$ e o tamanho médio de partícula igual a $11,29 \mu\text{m}$. As distribuições granulométricas destes materiais são ilustradas na Figura 29.

Figura 29 – Distribuição granulométrica da sílica ativa e do pó de quartzo.



7.1.3 Agregados naturais

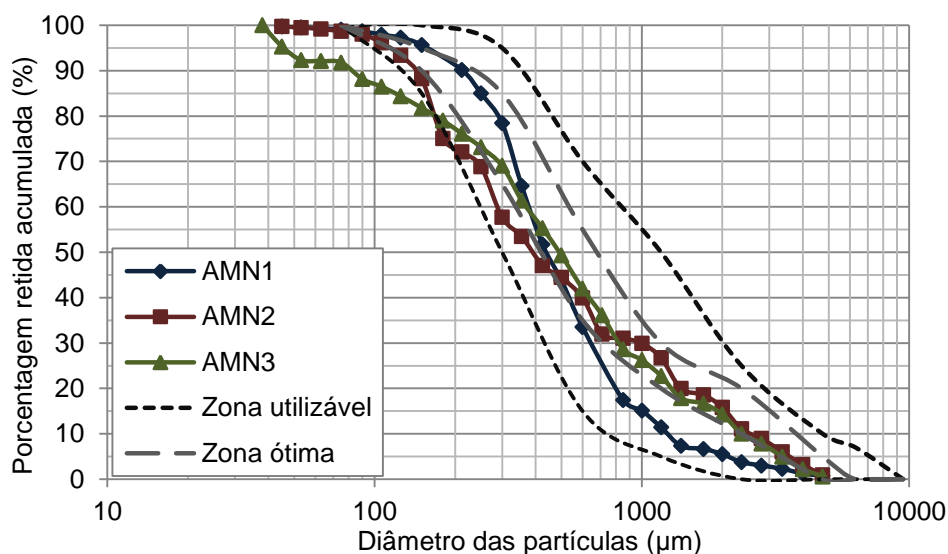
Foram utilizados três agregados miúdos naturais, de diferentes granulometrias. Tais agregados são referenciados como AMN1, AMN2 e AMN3 ao longo deste trabalho. As propriedades físicas destes materiais são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Caracterização física dos agregados miúdos naturais.

Propriedades físicas	AMN1	AMN2	AMN3	Referência Normativa
Diâmetro máximo (mm)	4,75	4,75	4,75	NM 248:2003
Módulo de finura	2,24	2,24	2,26	NM 248:2003
Massa S.S.S.	2,561	2,596	2,651	NM 52:2009
específica Seca	2,551	2,562	2,624	NM 52:2009
(g/cm ³) Aparente	2,576	2,653	2,697	NM 52:2009
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,628	1,521	1,561	NM 45:2002
Índice de vazios (%)	36,09	40,55	40,41	NM 45:2002
Absorção de água (%)	0,38	1,35	1,05	NM 30:2001
Impurezas orgânicas	Mais clara	Mais clara	Mais clara	NM 49:2001
Teor de pulverulentos (%)	0,92	8,14	3,12	NM 46:2003

A distribuição granulométrica dos agregados miúdos é ilustrada na Figura 30.

Figura 30 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos naturais.



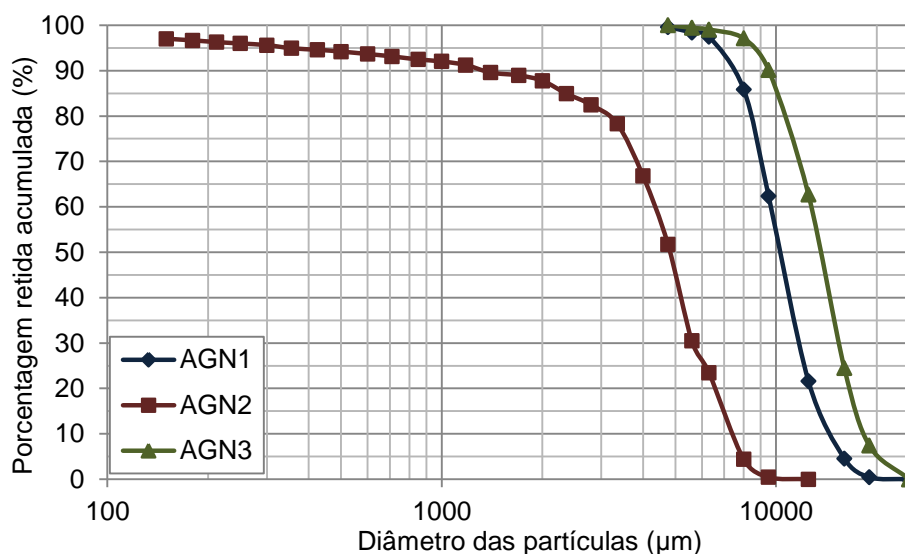
Os agregados graúdos naturais utilizados foram de origem basáltica, sendo empregados em três granulometrias distintas. Deste modo, tais agregados são referenciados como AGN1, AGN2 e AGN3. A caracterização física destes agregados é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Caracterização física da brita natural.

Propriedades físicas	AGN1	AGN2	AGN3	Referência Normativa
Diâmetro máximo (mm)	19,00	9,50	19,00	NM 248:2003
Módulo de finura	6,61	5,15	6,94	NM 248:2003
Massa S.S.S. específica (g/cm ³)	2,720	2,634	2,645	NM 53:2009
Seca	2,714	2,603	2,632	NM 53:2009
Aparente	2,731	2,686	2,667	NM 53:2009
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,453	1,463	1,616	NM 45:2002
Índice de vazios (%)	46,63	43,71	38,51	NM 45:2002
Absorção de água (%)	0,22	1,19	0,49	NM 53:2001
Teor de pulverulentos (%)	0,16	1,87	0,57	NM 46:2003

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos está ilustrada na Figura 31.

Figura 31 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos naturais.



A necessidade de utilização de agregados miúdos e graúdos naturais com distribuição granulométrica parecida (AMN1, AMN2 e AMN3; AGN1 e AGN3) se deu em função dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas, uma vez que os agregados naturais AMN1 e AGN1 não apresentaram a distribuição de tamanho de partículas mais adequada para a dosagem desses concretos.

7.1.4 Agregados reciclados

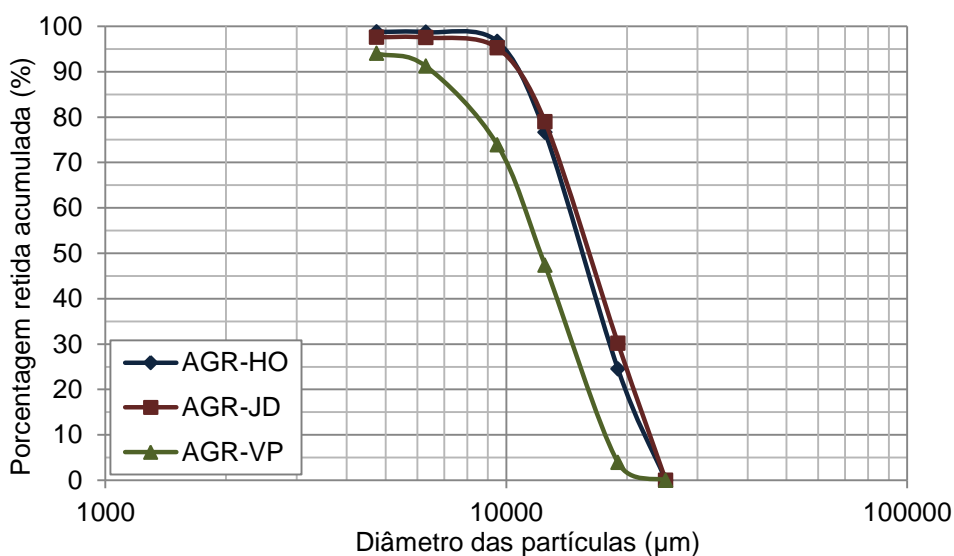
Para a definição dos agregados reciclados que seriam utilizados no desenvolvimento do presente trabalho foi feita uma seleção prévia, na qual foram coletadas amostras de agregados miúdos e graúdos reciclados em três diferentes usinas recicladoras do estado de São Paulo, localizadas nas cidades de Hortolândia, Jundiaí e Várzea Paulista. A seleção e a origem dos agregados a serem utilizados se baseou nas propriedades físicas apresentadas pelos mesmos e também no seu comportamento à lixiviação.

Nesta seção, as amostras foram identificadas pelo seguinte código: AXR-YZ, em que, X pode ser representado por G, quando se tratarem de agregados graúdos, ou por M, no caso de agregados miúdos. O código YZ representa o local onde as amostras foram coletadas, desta forma: HO, para os agregados

provenientes da cidade de Hortolândia; JD, para os oriundos de Jundiaí; e, VP, para aqueles coletados em Várzea Paulista.

Foram ensaiados três lotes de agregado graúdo reciclado (AGR), sendo uma de cada usina recicladora. Na Figura 32 é ilustrada a curva granulométrica obtida para tais agregados, de acordo com o procedimento previsto na NM 248:2003 (ABNT, 2003b). Observa-se que os agregados provenientes de Hortolândia e Jundiaí tem distribuição granulométrica similar, ao passo que aqueles oriundos de Várzea Paulista possuem granulometria mais fina. Cabe destacar ainda, que o AGR-VP possui uma percentagem expressiva (6,00%) de partículas menores que 4,75 mm, o que poderia causar dificuldades adicionais para sua aplicação. O diâmetro máximo de todos os AGR é 19,0 mm. O módulo de finura obtido para o AGR-HO é 7,14, do AGR-JD vale 7,11 e do AGR-VP é igual a 6,42.

Figura 32 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos reciclados.



Outros ensaios para a caracterização física foram executados, e os resultados encontram-se compilados na Tabela 16.

Tabela 16 – Propriedades físicas dos agregados graúdos reciclados.

Propriedades Físicas		AGR-HO	AGR-JD	AGR-VP	Referência Normativa
Massa específica (g/cm ³)	S.S.S. Seca Aparente	2,453	2,306	2,431	NM 53:2009
Absorção de água (%)		5,60	6,90	6,27	NM 53:2009
Massa unitária solta (g/cm ³)		1,239	1,095	1,340	NM 45:2002
Índice de vazios (%)		49,4	52,4	44,8	NM 45:2002
Teor de pulverulentos (%)		1,42	2,46	6,12	NM 46:2006

Em termos de massa específica, verifica-se que os agregados AGR-HO e AGR-VP apresentam valores similares, ao passo que o AGR-JD apresenta menor massa específica. Com relação a absorção de água, observa-se que o AGR-HO é o menos absorvente dos três, fator esse bastante positivo, pois indica menor porosidade desse agregado.

A massa unitária e o índice de vazios dos agregados analisados diferem bastante. A maior massa unitária e menor índice de vazios apresentados pelo AGR-VP podem ser justificados pela presença de uma fração expressiva de partículas menores que 4,75 mm, que seriam responsáveis pelo preenchimento dos vazios deixados pela fração graúda, o que contribui para melhor empacotamento das partículas. A menor massa unitária e maior índice de vazios exibidos pelo AGR-JD podem ser explicados pela menor massa específica deste agregado.

O teor de pulverulentos também variou bastante entre os três agregados avaliados. Percebe-se um teor muito elevado de materiais finos aderidos às partículas do AGR-VP, fator este que pode levar a aumento na demanda de água. Os demais agregados apresentaram teores menores de pulverulentos.

O comportamento dos agregados graúdos reciclados à lixiviação é apresentado na Tabela 17. Os limites de concentração de metais pesados nos extratos lixiviados são os constantes da relação do Anexo F da NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a). O pH dos extratos lixiviados foram 6,47, 6,13 e 6,27 para as amostras AGR-HO, AGR-JD e AGR-VP, respectivamente.

Tabela 17 – Concentração de metais no extrato lixiviado dos agregados graúdos reciclados.

Constituinte	Teor (mg/L)			Limite de quantificação (mg/L)	Limite Normativo (mg/L)
	AGR-HO	AGR-JD	AGR-VP		
Prata (Ag)	ND	ND	ND	0,025	5,0
Arsênio (As)	ND	ND	ND	0,025	1,0
Bário (Ba)	0,635	0,545	0,557	0,010	70,0
Cádmio (Cd)	ND	ND	ND	0,003	0,5
Cromo (Cr)	ND	ND	ND	0,010	5,0
Chumbo (Pb)	ND	ND	ND	0,025	1,0
Selênio (Se)	ND	ND	ND	0,025	1,0
Mercúrio (Hg)	ND	ND	ND	0,0002	0,1
Fluoreto (F ⁻)	1,19	1,97	1,22	0,020	150,0

ND = Não detectado.

Por meio da análise dos dados constantes na Tabela 17 é possível perceber que apenas bário e fluoreto foram detectados nas amostras de agregados reciclados, em limites muito inferiores aos prescritos pela NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a). Deste modo, pode-se verificar que o comportamento à lixiviação de todas as amostras foi similar, não havendo contaminação por metais pesados acima dos limites especificados na NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a).

Tendo em vista os resultados expostos, o agregado graúdo reciclado proveniente da usina recicladora de Hortolândia foi selecionado para o desenvolvimento desta pesquisa. Tal escolha se fundamenta na maior adequação das propriedades físicas apresentadas por este agregado, em especial da massa específica, absorção de água e teor de pulverulentos.

Após a seleção do agregado graúdo de RCD, o mesmo foi classificado de acordo com a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004c). A classificação proposta pela referida norma separa os agregados reciclados em quatro grupos, de acordo com o material predominante em sua composição. Os agregados do grupo I são aqueles constituídos por concreto ou argamassa, em mais de 50% do seu volume. Os do grupo II possuem mais de 50% do seu volume composto por rochas naturais. O grupo III é destinado aos materiais cerâmicos, tais como tijolos e telhas, estando excluídas as cerâmicas polidas. Por fim, o grupo IV é destinado a outros materiais, tais como vidros, madeiras, betumes, plásticos etc. Tal classificação está exposta na Tabela 18 a seguir.

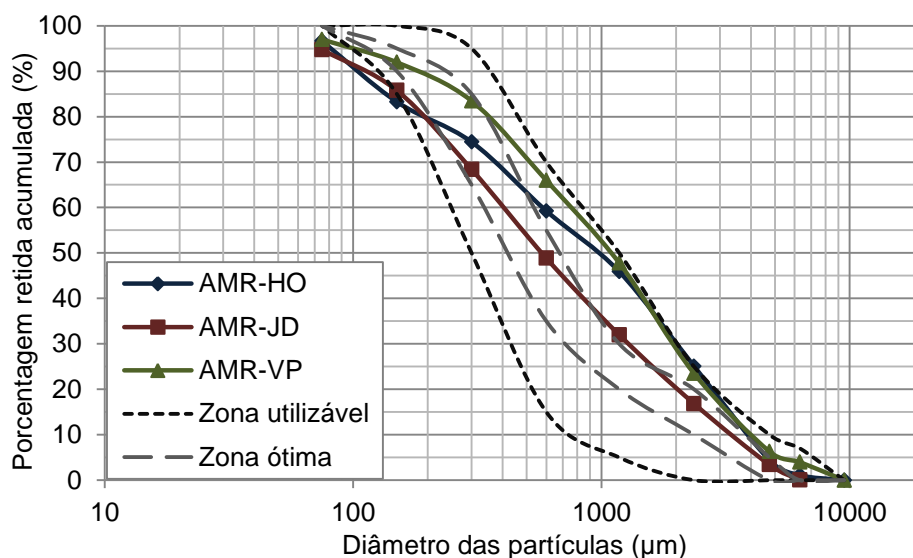
Tabela 18 – Classificação do agregado graúdo reciclado selecionado (AGR-HO).

Grupos	Amostra 1	Amostra 2	Média
GI - Concreto e Argamassa	61,8%	69,6%	65,7%
GII - Rochas Naturais	37,3%	28,7%	33,0%
GIII - Materiais Cerâmicos	0,5%	0,7%	0,6%
GIV - Materiais não minerais	0,4%	1,0%	0,7%
Total	100%	100%	100%
GI + GII	99,2%	98,3%	98,7%

Como se vê, o AGR-HO é constituído, predominantemente, por resíduos de concreto, argamassa e rochas naturais, fazendo com que o mesmo receba a nomenclatura de ARC (Agregado de Resíduo de Concreto) segundo a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004c). Contudo, no presente trabalho continuará se adotando o termo agregados reciclados de RCD para representar estes agregados.

A escolha do agregado miúdo reciclado também foi feita levando-se em consideração um lote oriundo de cada usina recicladora. Na Figura 33 é ilustrada a distribuição granulométrica das três amostras de agregado miúdo reciclado. Tal ensaio foi realizado conforme o procedimento previsto na NM 248:2003 (ABNT, 2003b). O diâmetro máximo de todos os agregados ensaiados foi igual a 4,75 mm. O módulo de finura do AMR-HO é 2,92, já o do AMR-JD vale 2,55 e o do AMR-VP é igual a 3,19. O agregado reciclado proveniente de Jundiaí encontra-se na zona ótima, segundo a NBR 7211:2009 (ABNT, 2009c), e os demais na zona limite superior.

Figura 33 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos reciclados.



Outras características físicas dos agregados miúdos reciclados são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Propriedades físicas dos agregados miúdos reciclados.

Propriedades Físicas		AMR-HO	AMR-JD	AMR-VP	Referência Normativa
Massa específica (g/cm ³)	S.S.S. Seca	2,276	2,291	2,173	NM 52:2009
	Aparente	2,070	2,115	1,974	NM 52:2009
		2,610	2,567	2,465	NM 52:2009
Absorção de água (%)		9,96	8,33	10,07	NM 30:2001
Massa unitária solta (g/cm ³)		1,341	1,356	1,152	NM 45:2002
Índice de vazios (%)		35,10	35,79	41,55	NM 45:2002
Impurezas orgânicas		Mais clara	Mais clara	Suspeita	NM 49:2001
Teor de pulverulentos (%)		7,89	11,14	16,77	NM 46:2006

Por meio da análise dos dados da Tabela 19, é possível notar que os agregados provenientes de Jundiaí e de Hortolândia apresentam propriedades bastante similares, com exceção ao teor de pulverulentos, que é maior no AMR-JD, e a absorção de água, que é mais pronunciada no AMR-HO. O AMR-VP apresentou desempenho inferior em todos os parâmetros analisados, quando comparado aos outros agregados reciclados. Além disso, há de se destacar a suspeita de contaminação deste agregado por matéria orgânica.

O comportamento dos agregados miúdos reciclados à lixiviação também foi avaliado e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Concentração de metais no extrado lixiviado dos agregados miúdos reciclados.

Constituinte	Teor (mg/L)			Limite de quantificação (mg/L)	Limite Normativo (mg/L)
	AMR-HO	AMR-JD	AMR-VP		
Prata (Ag)	ND	ND	ND	0,025	5,0
Arsênio (As)	ND	ND	ND	0,025	1,0
Bário (Ba)	0,592	0,553	0,477	0,010	70,0
Cádmio (Cd)	ND	ND	ND	0,003	0,5
Cromo (Cr)	ND	ND	ND	0,010	5,0
Chumbo (Pb)	ND	ND	ND	0,025	1,0
Selênio (Se)	ND	ND	ND	0,025	1,0
Mercúrio (Hg)	ND	ND	ND	0,0002	0,1
Fluoreto (F ⁻)	1,68	1,30	1,05	0,020	150,0

ND = Não detectado.

O pH das amostras foi igual a 6,81 para o AMR-HO, 6,38 para o AMR-JD e 6,81, para o AMR-VP. Deste modo, e de acordo com os dados constantes na Tabela 20, pode-se observar que o comportamento à lixiviação de todas as amostras é similar, sendo apenas detectadas pequenas frações de bário e fluoreto, ambas muito inferiores aos limites preconizados pela NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a). Comportamento análogo foi observado para os agregados graúdos reciclados.

Considerando os resultados apresentados, nota-se que dois agregados miúdos reciclados melhor se adequariam ao trabalho a ser desenvolvido, o AMR-HO e o AMR-JD. O agregado reciclado proveniente da usina recicladora de Hortolândia foi selecionado em virtude do menor índice de vazios e teor de pulverulentos, além de permitir o uso de agregados reciclados de uma única fonte, pois os agregados graúdos reciclados também foram oriundos de Hortolândia.

Para a utilização dos agregados reciclados na produção de concreto, os mesmos deverão atender aos limites expostos na NBR 15116:2004 (ABNT, 2004c), no que tange a absorção de água, máximo de 7,0% para os agregados graúdos e 12% para os miúdos, e ao teor de pulverulentos, que deve ser menor ou igual a 10% para a fração graúda e 15% para a miúda. Nota-se que os agregados reciclados selecionados apresentaram valores de absorção de água e teor de pulverulentos inferiores aos limites estabelecidos pela NBR 15116:2004 (ABNT, 2004c), estando, portanto, aptos para o uso.

7.1.5 Aditivo químico

As principais características do aditivo superplastificante utilizado foram fornecidas pelo fabricante, e encontram-se transcritas na Tabela 21.

Tabela 21 – Propriedades físicas do aditivo.

Propriedades Físicas do Aditivo	
Aspecto/Cor	Líquido alaranjado
Dosagem (% sobre a massa de cimento)	0,40-1,00%
pH	3,00-6,00
Massa específica (g/cm ³)	1,055-1,105

Fonte: Grace Construction Products, 2015.

7.2 Dosagem

7.2.1 Método de Repette-Melo

A composição do concreto de referência, que empregou somente agregados naturais, foi uma reprodução da dosagem estabelecida por Vita (2011), por meio do método de Repette-Melo (MELO, 2005). Optou-se por este traço uma vez que já haviam resultados consistentes sobre a determinação dos teores ótimos de adição mineral, agregado miúdo e aditivo superplastificante, com base em estudos reométricos. Deste modo, a contribuição deste trabalho foi analisar a influência exercida pela incorporação de agregados reciclados de RCD nas propriedades reológicas das argamassas e no estado fresco dos concretos produzidos, e também nas propriedades mecânicas dos concretos.

Para o estabelecimento da dosagem do traço adotado como referência, Vita (2011) executou um minucioso estudo reológico das pastas de cimento com adição de sílica ativa em teores de 2 a 10%. O teor de aditivo superplastificante foi fixado em 0,30%, em relação à massa de cimento. O referido autor verificou que o teor ótimo de adição mineral foi igual a 6%. Deste modo, neste estudo, somente houve a caracterização reológica da pasta de cimento proveniente do concreto de referência, uma vez que não houveram alterações nos consumos de cimento, sílica ativa e água de amassamento nos concretos que empregaram agregados reciclados. A dosagem da pasta de cimento estudada é apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 – Dosagem da pasta de cimento oriunda dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

Material	Consumo (kg/m³)
Cimento	1246,00
Sílica ativa	74,80
Aditivo superplastificante	3,74
Água	564,90

No tocante a determinação da dosagem da argamassa autoadensável, Vita (2011) avaliou o desempenho de composições com teores de agregado miúdo que variaram de 40 a 45%, em volume, e de aditivo superplastificante de 0,30 a 0,50%, em relação à massa de cimento. Os teores ótimos de areia e aditivo

adotados naquele estudo foram 45% e 0,40%, respectivamente. Assim, nesse trabalho, foram verificadas as propriedades reológicas da argamassa autoadensável estabelecida por Vita (2011), aqui identificada por ARG-REF, e também da argamassa com substituição parcial da areia natural por agregado miúdo reciclado, aqui referida como ARG-AMR. Os traços definitivos das argamassas estudadas são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Dosagem das argamassas provenientes dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

Material	Consumo (kg/m ³)	
	ARG-REF	ARG-AMR
Cimento	682,80	682,80
Sílica ativa	41,00	41,00
Areia natural (AMN1)	1184,50	947,60
Agregado miúdo reciclado	-	236,90
Aditivo superplastificante	2,73	3,41
Água	Amassamento	309,50
	Pré-molhagem	-
		18,60

Mediante análise dos dados constantes na Tabela 23 é possível notar que houve necessidade de incremento no teor de aditivo superplastificante (0,50% em relação à massa de cimento) na argamassa ARG-AMR para que a mesma exibisse propriedades reológicas similares às da ARG-REF (produzida com 0,40% de aditivo superplastificante, em relação à massa de cimento). Maiores comentários sobre tal ajuste são tecidos no item 7.3.2 do presente trabalho.

Por fim, a dosagem do concreto de referência (VITA, 2011) foi determinada mediante a incorporação do agregado graúdo e do ajuste no teor de aditivo superplastificante, para que o mesmo apresentasse as propriedades de autoadensabilidade requeridas. Nesse estudo, o parâmetro de autoadensabilidade fixado foi o diâmetro de espalhamento, que deveria estar situado entre 650±65 mm, além do pleno atendimento aos demais requisitos normativos (viscosidade plástica, habilidade passante e resistência à segregação). Conforme já mencionado, foram estabelecidos outros três traços, em que houve a substituição parcial dos agregados naturais por agregados reciclados. O consumo de materiais dos concretos estudados é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 – Dosagem dos concretos pelo método de Repette-Melo.

Material	Consumo (kg/m ³)			
	CAA-REF	CAA-AGR	CAA-AMR	CAA-AGMR
Cimento	486,60	486,60	486,60	486,60
Sílica ativa	29,20	29,20	29,20	29,20
Areia média (AMN1)	844,18	844,18	675,34	675,34
Brita natural (AGN1)	814,72	651,78	814,72	651,78
Agregado miúdo reciclado	-	-	168,84	168,84
Agregado graúdo reciclado	-	162,94	-	162,94
Aditivo superplastificante	2,26	2,97	3,21	3,41
Água	Amassamento	220,6	220,60	220,60
	Pré-molhagem	-	7,31	13,29

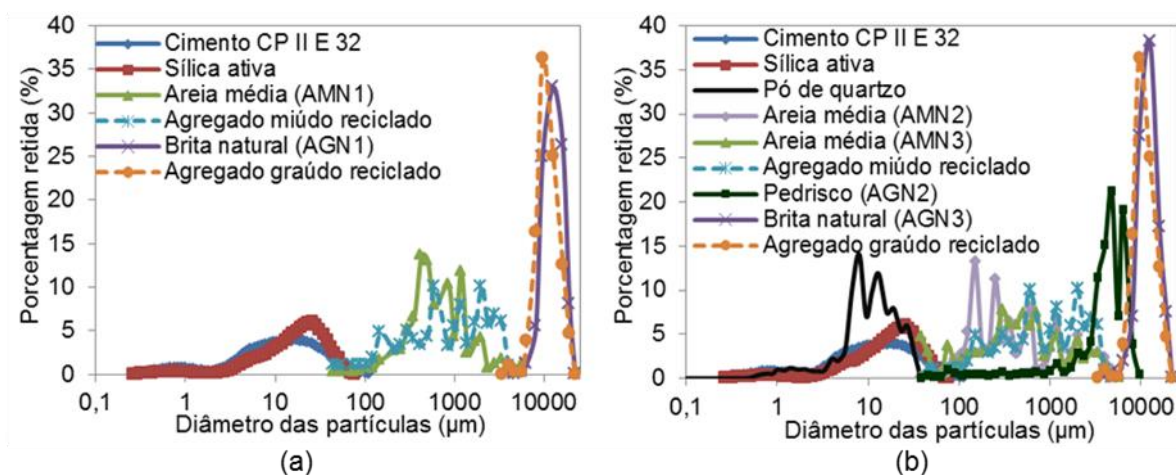
Cabe destacar que os agregados reciclados foram submetidos à pré-molhagem, de modo a evitar a absorção excessiva da água de amassamento. A água de pré-molhagem correspondeu a 80% da capacidade de absorção de água do agregado reciclado, conforme recomenda a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004). No entanto, ainda foi verificada a necessidade de correção do teor de aditivo superplastificante para as misturas de concreto que empregaram agregados reciclados, quando comparadas ao traço de referência. É importante ressaltar que este ajuste foi efetuado cautelosamente, a fim de prevenir qualquer efeito adverso que poderia ocorrer no caso de super dosagem de aditivo. A necessidade do incremento na dosagem do aditivo superplastificante para a obtenção das propriedades de autoadensabilidade em concretos que empregaram agregados reciclados também é relatada por Pereira-de-Oliveira *et al.* (2014), Silva *et al.* (2016) e Señas, Priano e Marfil (2016).

7.2.2 Empacotamento de partículas

Ao analisar a distribuição granulométrica discreta dos materiais empregados na produção dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo, apresentada na Figura 34(a), é possível notar a deficiência de certos tamanhos de partículas, principalmente na interface entre os agregados graúdos e miúdos e entre estes e os materiais finos. Por este fato, novos materiais, de granulometrias distintas, foram introduzidos à mistura, de modo a preencher tais lacunas granulométricas. A distribuição granulométrica discreta dos materiais utilizados nos

concretos dosados com aplicação do conceito de empacotamento de partículas é exibida na Figura 34(b).

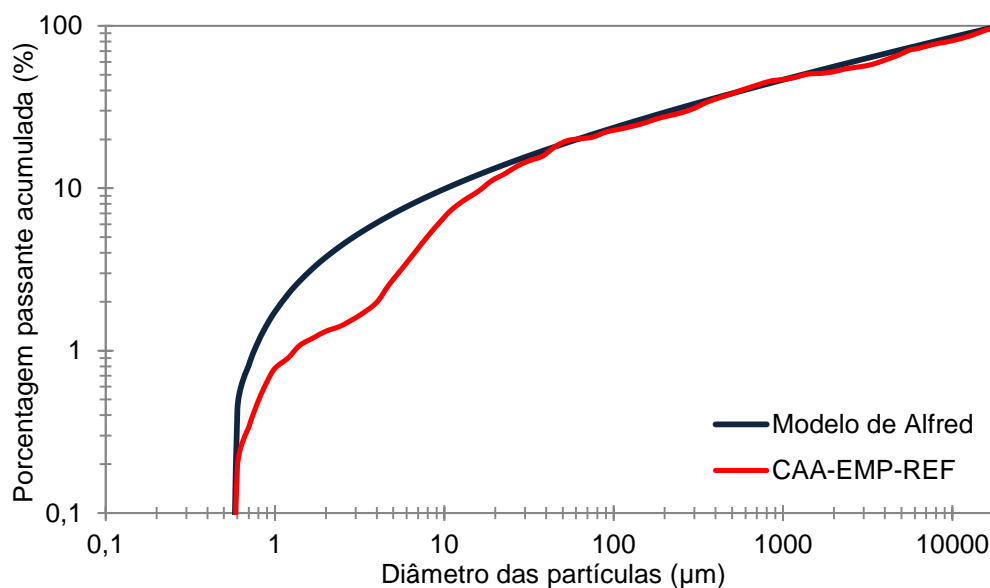
Figura 34 – Distribuição granulométrica discreta dos materiais empregados nos concretos dosados pelo (a) método de Repette-Melo e (b) com aplicação do conceito de empacotamento de partículas.



Na dosagem dos concretos com aplicação do conceito de empacotamento de partículas foi adotado o modelo de Alfred. As composições foram determinadas com auxílio de uma planilha desenvolvida no *software Microsoft Excel*, com a utilização da ferramenta de programação linear *Solver*. Os parâmetros de dosagem estabelecidos, em função do tamanho dos materiais particulados, foram: $D_L = 19000 \mu\text{m}$, $D_S = 0,5 \mu\text{m}$ e $q = 0,225$. Segundo Vanderlei (2004) e Vogt (2010) o coeficiente de distribuição q deve estar situado entre 0,20-0,25 para misturas autoadensáveis. Por esse motivo, nesse trabalho, foi adotado o valor médio (0,225) para o coeficiente q . A curva de empacotamento resultante para o concreto EMP-REF é apresentada na Figura 35.

Por meio da análise da Figura 35 nota-se que houve dificuldade em otimizar a fração de partículas mais finas que $20 \mu\text{m}$, fazendo com que existisse um maior distanciamento entre as curvas do modelo e a real. Infelizmente, não foi possível preencher esta lacuna granulométrica, dado que não havia disponibilidade de outros materiais particulados para tal finalidade. Cabe salientar que nesse estudo procurou-se utilizar materiais amplamente empregados pela construção civil, sem recorrer a materiais particulados específicos, utilizados em outros setores, como na produção de cerâmicas, vidros, tintas, abrasivos etc.

Figura 35 – Curvas de empacotamento do modelo de Alfred e do concreto CAA-EMP-REF.



A partir do concreto EMP-REF foram dosadas as misturas EMP-AGR, EMP-AMR e EMP-AGMR, nas quais houve substituição parcial dos agregados graúdos e/ou miúdos naturais, pelos correspondentes agregados reciclados de RCD. Cabe destacar que a relação de água/materiais secos (em massa) das composições dosadas com base no conceito de empacotamento de partículas foi mantida a mesma das misturas dosadas pelo método de Repette-Melo, ou seja, igual a 10,14%. No que tange ao teor de aditivo superplastificante, este foi ajustado experimentalmente até que o diâmetro de espalhamento das misturas se apresentasse no intervalo de 650 ± 65 mm. Os traços dos concretos dosados pelo modelo de Alfred são apresentados na Tabela 25.

A pré-molhagem dos agregados reciclados foi efetuada de modo análogo ao empregado para as composições dosadas pelo método de Repette-Melo, a fim de evitar a absorção excessiva da água de amassamento. É importante destacar também que no caso dos concretos EMP-AMR e EMP-AGMR houve a necessidade de incremento no teor de aditivo superplastificante, em comparação ao concreto EMP-REF. Maiores considerações sobre este fato são tecidas no item 7.3.3.

Tabela 25 – Dosagem dos concretos com aplicação do conceito de empacotamento de partículas.

Material	Consumo (kg/m ³)			
	EMP-REF	EMP-AGR	EMP-AMR	EMP-AGMR
Cimento	329,50	329,50	329,50	329,50
Sílica ativa	29,40	29,40	29,40	29,40
Pó de quartzo	36,50	36,50	36,50	36,50
Areia média (AMN2)	122,30	122,30	97,80	97,80
Areia média (AMN3)	672,80	672,80	538,20	538,2
Pedrisco (AGN2)	261,70	261,70	261,70	261,70
Brita natural (AGN3)	722,30	525,50	722,30	525,50
Agregado miúdo reciclado	-	-	159,00	159,00
Agregado graúdo reciclado	-	196,80	-	196,80
Aditivo superplastificante	1,65	1,65	1,98	2,14
Água	Amassamento	220,60	220,60	220,60
	Pré-molhagem	-	8,80	12,50

A partir dos traços dos concretos foram estabelecidas as dosagem das argamassas autoadensáveis, sendo denominada de ARG-EMP-REF a argamassa proveniente das composições EMP-REF e EMP-AGR, que somente empregaram agregados miúdos naturais, e de ARG-EMP-AMR a argamassa oriunda das misturas EMP-AMR e EMP-AGMR, que empregaram agregados miúdos reciclados em sua composição. A dosagem definitiva das argamassas é apresentada na Tabela 26.

Tabela 26 – Dosagem das argamassas oriundas dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

Material	Consumo (kg/m ³)	
	ARG-EMP-REF	ARG-EMP-AMR
Cimento	501,90	501,90
Sílica ativa	44,80	44,80
Pó de quartzo	55,70	55,70
Areia média (AMN2)	186,30	149,00
Areia média (AMN3)	1024,70	819,80
Agregado miúdo reciclado	-	242,20
Aditivo superplastificante	7,03	7,03
Água	Amassamento	336,00
	Pré-molhagem	-

A dosagem da pasta de cimento proveniente dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas é apresentada na Tabela 27. Uma vez que os consumos de cimento, sílica ativa, pó de quartzo e água de amassamento foram mantidos constantes nos concretos, somente uma pasta de

cimento foi caracterizada. O teor de aditivo superplastificante utilizado foi o mesmo empregado para a pasta de cimento dosada pelo método de Repette-Melo, ou seja, 0,30% em relação à massa de cimento.

Tabela 27 – Dosagem da pasta de cimento proveniente dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

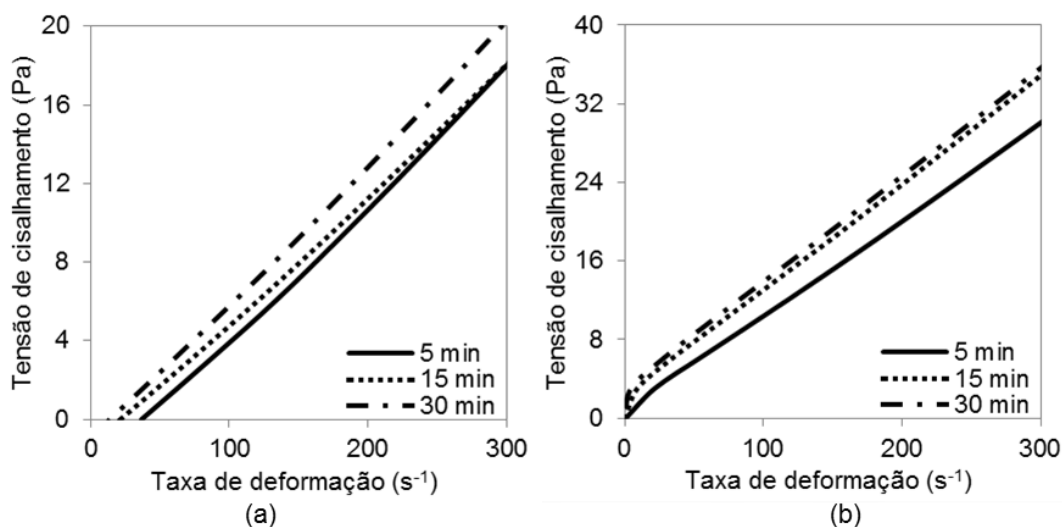
Material	Consumo (kg/m ³)
Cimento	932,90
Sílica ativa	83,30
Pó de quartzo	103,40
Aditivo superplastificante	2,80
Água	624,50

7.3 Propriedades reológicas

7.3.1 Pastas de cimento

As curvas de fluxo para as pastas de cimento provenientes dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo e com aplicação do conceito de empacotamento de partículas são apresentadas na Figura 36.

Figura 36 – Curvas de fluxo das pastas de cimento: (a) método de Repette-Melo e (b) empacotamento de partículas.



Cabe destacar que as curvas de fluxo obtidas são provenientes da etapa descendente do ciclo de cisalhamento aplicado (vide item 6.2.2.1) e os resultados apresentados na Figura 36 se referem às médias de três determinações, sendo possível consultar os dados individuais no Apêndice A. Mediante análise dos dados da referida Figura, é possível verificar que as pastas de cimento apresentaram comportamento reológico similar ao longo do tempo, uma vez que as curvas de fluxo não apresentaram grande distanciamento durante o decorrer do ensaio.

Com relação aos parâmetros reológicos, a pasta de cimento proveniente dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo apresentou comportamento de um fluido Newtoniano, apresentado na Equação 1 (vide item 4.1.1). Já a pasta de cimento oriunda dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas exibiu tensão limite de escoamento, sendo que o modelo reológico que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Bingham, já apresentado anteriormente na Equação 3 (item 4.2.2). As propriedades reológicas das pastas de cimento são apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28 – Parâmetros reológicos das pastas de cimento.

Pasta	Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Coefficiente R²
Repette-Melo	5	-	0,0557	-	0,9537
	15	-	0,0575	-	0,9821
	30	-	0,0645	-	0,9903
Empacotamento de partículas	5	0,5231	-	0,0981	0,9994
	15	1,6593	-	0,1110	0,9978
	30	2,2509	-	0,1121	0,9960

Com relação à pasta de cimento dosada pelo método de Repette-Melo nota-se que houve incremento na viscosidade ao longo do tempo, o que reflete o processo de hidratação do cimento. O fato dessa pasta de cimento não exibir tensão limite de escoamento pode estar relacionado com a ação do aditivo superplastificante, que liquefez a mistura. Roussel e le Roy (2005) destacam que um modelo puramente viscoso pode ser adequado para descrever o comportamento reológico de pastas de cimento no estado fresco.

Por outro lado, a pasta de cimento oriunda dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas apresentou tensão de

escoamento, em todos os tempos de ensaio. Tanto a viscosidade plástica quanto a tensão de escoamento cresceram com a evolução no tempo de ensaio. Os resultados obtidos nesse trabalho vão ao encontro dos reportados na literatura. Schwartzentruber, le Roy e Cordin (2006), por exemplo, produziram pastas de cimento para CAA com tensões de escoamento variando de 0,70 até 25 Pa e com viscosidade plástica entre 0,123 e 0,676 Pa.s. Mais recentemente, Choi, Park e Oh (2016) observaram que a tensão de escoamento variou de 3,5 a 27,6 Pa e a viscosidade plástica entre 0,055 e 0,197 Pa.s em pastas de cimento destinadas à produção de CAA.

Por fim, cabe ressaltar que as pastas ensaiadas apresentaram boa fluidez, sem no entanto, exibir exsudação de água ou segregação dos componentes, sendo, portanto, adequadas para a aplicação pretendida.

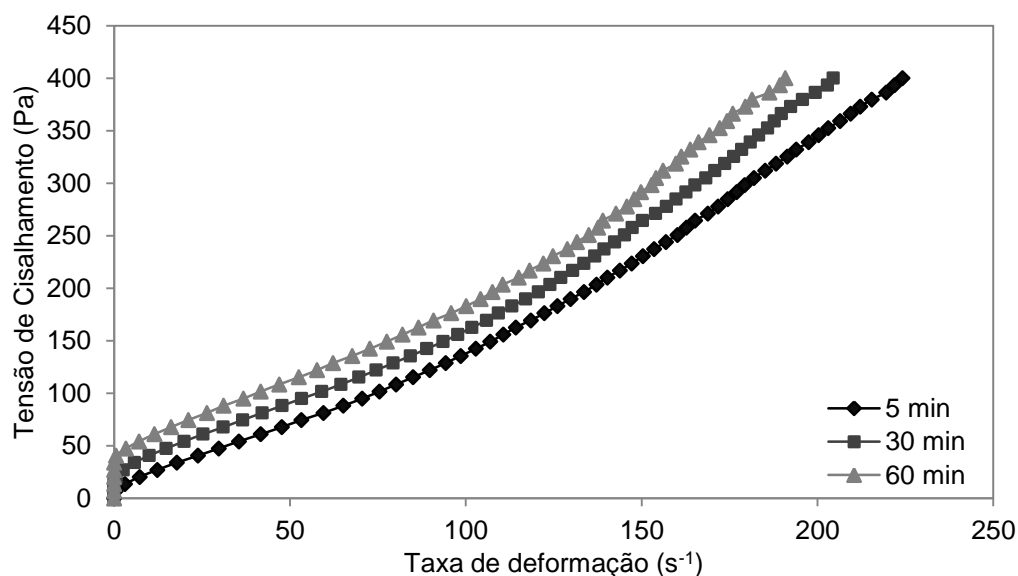
7.3.2 Argamassas

7.3.2.1 Ensaio reométricos

As curvas de fluxo da argamassa de referência, dosada pelo método de Repette-Melo, são apresentadas na Figura 37. Os resultados aqui exibidos referem-se às médias obtidas em quatro determinações. Os dados individuais podem ser consultados no Apêndice A. Todas as curvas de fluxo exibidas nesta seção são provenientes da última etapa do ciclo de cisalhamento aplicado (descendente), conforme protocolo de ensaio apresentado no item 6.2.2.1.

Nesse trabalho, os modelos reológicos utilizados para a determinação das propriedades reológicas das argamassas foram o de Bingham, o de Bingham modificado e o de Herschel-Bulkley. O modelo reológico que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais foi o de Bingham modificado. A título informativo, os resultados obtidos para os ajustes aos outros modelos reológicos (Bingham e Herschel-Bulkley) são apresentados no Apêndice A.

Figura 37 – Curvas de fluxo da argamassa ARG-REF.



O modelo de Bingham modificado é uma extensão do modelo de Bingham, no qual é inserido um termo de segunda ordem, a fim de capturar pequenas não-linearidades observadas no comportamento reológico de compósitos cimentícios (GÜNEYISI *et al.*, 2016). Feys *et al.* (2013) ressaltam que o modelo de Bingham modificado pode descrever melhor o comportamento não-linear de materiais dilatantes com tensão de escoamento, desde que o índice de comportamento (n) do modelo de Herschel-Bulkley seja inferior a 2, que é o caso típico dos materiais cimentícios. O modelo de Bingham modificado é representado na Equação 9.

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl}\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2 \quad (9)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento, τ_0 é a tensão de escoamento, μ_{pl} é a viscosidade plástica, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação e c é uma constante.

As propriedades reológicas da argamassa ARG-REF são sintetizadas na Tabela 29. É possível observar o incremento da tensão de escoamento e da viscosidade ao longo do tempo, comportamento este relacionado ao processo de hidratação e formação da microestrutura do cimento.

Tabela 29 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-REF.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s²)	Coefficiente R²
5	12,8757	0,8913	0,0038	0,9991
30	24,8477	0,9473	0,0043	0,9968
60	35,9230	1,2132	0,0034	0,9923

Na determinação das propriedades reológicas da argamassa ARG-AMR partiu-se do teor ótimo de aditivo superplastificante obtido para a argamassa de referência. Foi verificado que este teor de aditivo (0,40%, em relação à massa de cimento), não conferiu comportamento reológico similar ao da mistura ARG-REF para a argamassa ARG-AMR. Deste modo, outros teores de aditivo superplastificante (0,50 e 0,60%) foram testados. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 30 e se referem aos valores médios de três determinações.

Tabela 30 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-AMR.

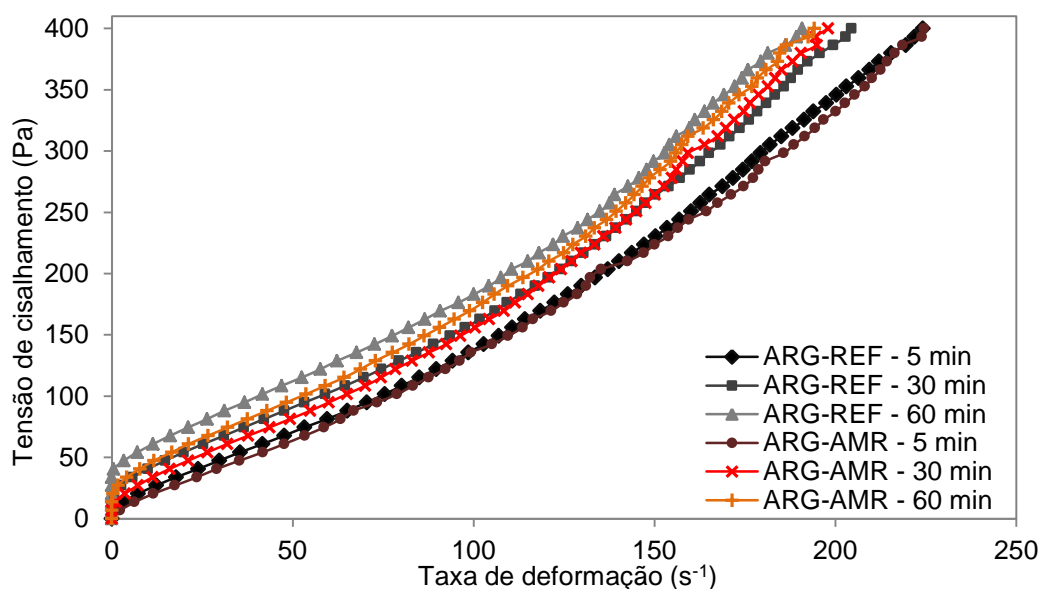
Teor aditivo (%)	Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s²)	Coefficiente R²
0,40	5	26,0663	0,9925	0,0034	0,9964
	30	42,7597	1,4275	0,0023	0,9877
	60	ND	ND	ND	ND
0,50	5	9,0786	0,8804	0,0037	0,9991
	30	20,1547	0,8316	0,0055	0,9977
	60	27,0833	0,9966	0,0047	0,9958
0,60	5	4,2374	0,9015	0,0037	0,9991
	30	8,4748	0,9912	0,0044	0,9993
	60	20,5360	0,8400	0,0063	0,9974

ND= não determinado.

Observa-se por meio da análise dos dados da Tabela 30, que a mistura ARG-AMR, com 0,40% de aditivo, apresentou tensão de escoamento e viscosidade superiores às da argamassa ARG-REF. Esse aumento na tensão de escoamento atingiu uma magnitude tal que, após 60 minutos, não foi possível ensaiar a mistura no reômetro por limitação de torque do equipamento. Tal incremento é atribuído as características físicas dos agregados reciclados, tais como maior absorção de água, maior teor de pulverulentos, formato mais irregular e textura mais rugosa das partículas. Todos estes fatores influenciam negativamente a fluidez da argamassa, o que se reflete em aumento da tensão de escoamento e da viscosidade plástica, como comprovado mediante os resultados obtidos.

Os parâmetros reológicos da argamassa ARG-AMR com 0,50% de aditivo apresentaram melhor concordância com os da argamassa de referência. O uso de 0,60% de aditivo superplastificante, por sua vez, causou maior redução na tensão de escoamento, sem no entanto, alterar significativamente a viscosidade plástica da mistura. Desta maneira, o teor ótimo de aditivo para a argamassa AMR foi fixado como 0,50%, em relação à massa de cimento. As curvas de fluxo da argamassa de referência (com 0,40% de aditivo) e da ARG-AMR, com 0,50% de aditivo, são apresentadas na Figura 38, e vão ao encontro do mencionado anteriormente.

Figura 38 – Curvas de fluxo das argamassas ARG-REF e ARG-AMR.



Para a argamassa ARG-EMP-REF foram testados três teores de aditivo superplastificante, a fim de determinar o ponto ótimo de dosagem. Ensaios prévios indicaram que esta argamassa demandaria mais aditivo superplastificante do que àquela dosada pelo método de Repette-Melo. A explicação para este fato pode estar relacionada ao maior teor de finos presente nos agregados miúdos empregados na ARG-EMP-REF. Enquanto que a areia natural (AMN1) utilizada na produção da argamassa ARG-REF continha apenas 0,92% de materiais pulverulentos, os agregados miúdos naturais AMN2 e AMN3, empregados na argamassa ARG-EMP-REF, apresentaram teores de pulverulentos iguais a 8,14% e 3,12%, respectivamente. As propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-REF são apresentadas na Tabela 31, e referem-se às médias de três determinações. O

modelo reológico que apresentou melhor aderência aos dados experimentais foi o de Bingham modificado.

Tabela 31 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-REF.

Teor aditivo (%)	Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²
1,30	5	6,2244	1,4677	0,0067	0,9996
	30	14,3060	2,6367	0,0081	0,9984
	60	ND	ND	ND	ND
1,40	5	5,4012	1,4631	0,0080	0,9995
	30	8,5618	2,7191	0,0071	0,9993
	60	25,3350	4,3558	0,0045	0,9940
1,50	5	1,9802	1,2952	0,0057	0,9997
	30	6,3522	1,9852	0,0070	0,9996
	60	19,8597	2,8911	0,0098	0,9960

ND = não determinado.

Pela análise dos dados constantes na Tabela 31 é possível notar que, conforme incremento no teor de aditivo superplastificante, houve decréscimo na tensão de escoamento e na viscosidade plástica. Cabe salientar que, aos 60 minutos, para a mistura com 1,30% de aditivo, não foi possível a execução do ensaio reométrico, uma vez que as tensões aplicadas pelo reômetro não foram capazes de superar a tensão de escoamento do material ensaiado. Os parâmetros reológicos das argamassas ARG-EMP-REF com 1,40 e 1,50% de aditivo superplastificante, em relação à massa de cimento, apresentaram propriedades adequadas de autoadensabilidade. Deste modo, o teor de 1,40% foi fixado como teor ótimo, uma vez que a mistura apresentou as propriedades requeridas, com menor consumo de aditivo.

A determinação do teor ótimo de aditivo superplastificante para a argamassa ARG-EMP-AMR foi executada de modo análogo ao empregado para a argamassa ARG-EMP-REF. Os teores de aditivo estabelecidos foram 1,30, 1,40 e 1,50%, em relação à massa de cimento. Na Tabela 32 são apresentadas as propriedades reológicas das argamassas ARG-EMP-AGR. Os resultados referem-se à média de três determinações. O modelo reológico que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o modelo de Bingham modificado.

Tabela 32 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-AMR.

Teor aditivo (%)	Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²
1,30	5	2,4171	1,0836	0,0049	0,9997
	30	9,6314	1,7774	0,0059	0,9992
	60	ND	ND	ND	ND
1,40	5	1,8680	1,0852	0,0045	0,9968
	30	4,5443	1,1473	0,0061	0,9996
	60	16,8453	1,8372	0,0074	0,9963
1,50	5	1,6881	1,0125	0,0042	0,9999
	30	5,2926	1,2098	0,0067	0,9993
	60	10,7531	1,8985	0,0088	0,9986

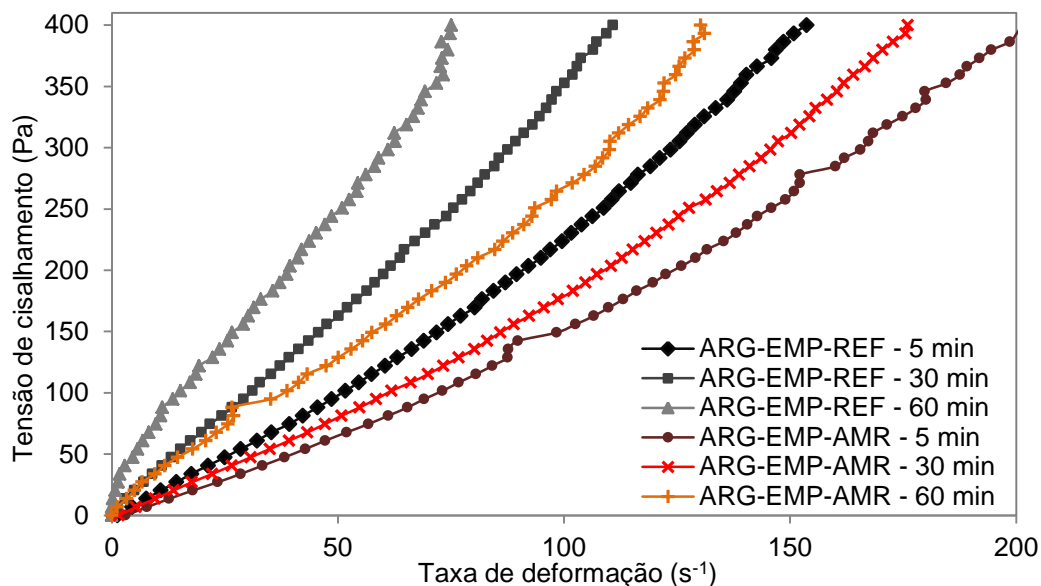
ND = não determinado.

Mediante análise dos dados constantes na Tabela 32, é possível notar que os teores de aditivo de 1,40 e 1,50%, em relação à massa de cimento, propiciaram comportamento reológico similar para a argamassa ARG-EMP-AMR. Novamente, com 1,30% de aditivo superplastificante não foi possível ensaiar a mistura aos 60 minutos no reômetro em virtude da limitação de torque do equipamento. Observa-se também, que a argamassa ARG-EMP-AMR apresentou tensão de escoamento e viscosidade plástica inferiores às da argamassa ARG-EMP-REF, para todos os teores de aditivo e tempos de ensaio. Esse fato pode estar relacionado ao teor de materiais pulverulentos presente nos agregados naturais utilizados, AMN2 e AMN3, com 8,14% e 3,12% de partículas passantes, por lavagem, na peneira de abertura 75 µm, respectivamente, que, de certo modo, são similares aos do agregado miúdo reciclado (7,89%), fazendo com que este não cause tamanha influência nas propriedades reológicas da argamassa. Comportamento inverso foi observado no caso da mistura ARG-AMR, em relação à argamassa ARG-REF. Neste caso, o teor de pulverulentos presente no agregado natural utilizado na ARG-REF, igual a 0,92%, foi muito inferior ao do agregado miúdo reciclado.

O teor ótimo de aditivo superplastificante para a argamassa ARG-EMP-AMR foi fixado em 1,40%, em relação à massa de cimento, de mesmo modo que para a mistura ARG-EMP-REF. As curvas de fluxo das argamassas provenientes dos concretos dosados com aplicação do conceito de empacotamento de partículas são apresentadas na Figura 39. Como mencionado anteriormente, a argamassa ARG-EMP-AMR apresentou maior fluidez do que a respectiva mistura de referência,

fazendo com que as curvas de fluxo das duas argamassas apresentassem maior distanciamento entre si.

Figura 39 – Curvas de fluxo das argamassas ARG-EMP-REF e ARG-EMP-AMR.



7.3.2.2 Ensaios empíricos

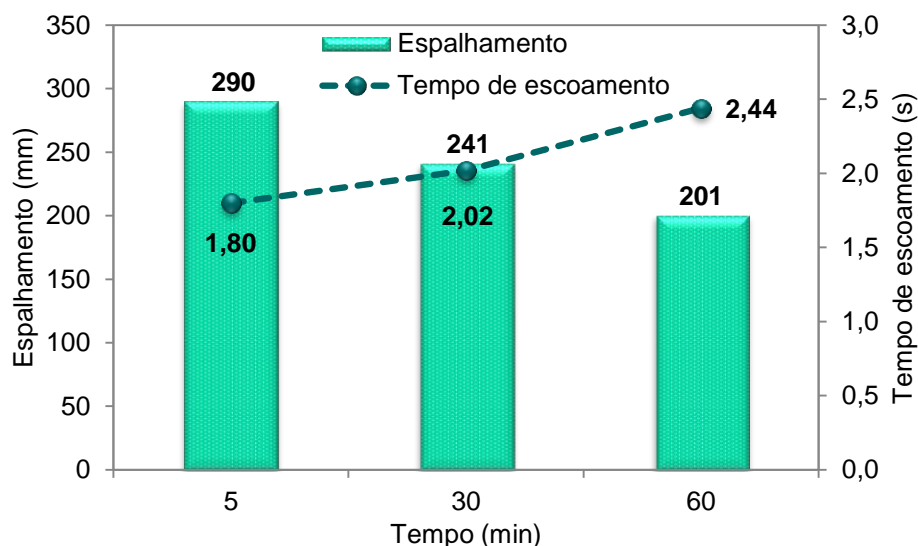
Os ensaios empíricos de mini-espalhamento e mini-funil V foram realizados simultaneamente aos testes reométricos. Os resultados apresentados nesta seção se referem às médias de três determinações, sendo os dados individuais apresentados no Apêndice A. O aspecto visual do espalhamento da argamassa ARG-REF é ilustrado na Figura 40.

Figura 40 – Aspecto visual do espalhamento da argamassa ARG-REF: (a) aos 5 minutos; (b) aos 30 minutos; (c) aos 60 minutos;



Os diâmetros médios de espalhamento e os tempos de escoamento da argamassa ARG-REF são apresentados na Figura 41.

Figura 41 – Espalhamento e tempo de escoamento da argamassa ARG-REF.



Ao analisar os dados constantes na Figura 41, é possível notar que o diâmetro de espalhamento diminui ao longo do tempo, enquanto o tempo de escoamento aumenta. Os valores típicos de espalhamento de argamassas autoadensáveis estão situados na faixa de 200 a 280 mm, de acordo com Melo (2005). Já o tempo de escoamento deve estar no intervalo de 3,5 a 10 s (MELO, 2005). Tais valores são tomados como base por Melo (2005) para a determinação da dosagem de argamassas autoadensáveis.

Neste estudo, procurou-se obter argamassas que apresentassem espalhamento dentro do faixa proposta por Melo (2005) após decorridos 60 minutos da mistura, a fim de assegurar que as propriedades de autoadensabilidade dos concretos se manteriam por tempo suficiente para aplicação do material. Os tempos de escoamento, em alguns casos, foram inferiores a 3,5 s, indicando misturas mais fluidas. Cabe ressaltar que nenhuma das misturas apresentou indícios de segregação ou exsudação, mesmo apresentando alta fluidez. No caso da argamassa ARG-REF, observa-se que aos 30 e 60 minutos o espalhamento encontra-se dentro da faixa estabelecida por Melo (2005), sendo que, aos 5 minutos, encontra-se ligeiramente acima dos limites estabelecidos. Com relação ao tempo de escoamento, este foi inferior ao prescrito por Melo (2005), em todos os momentos em que a argamassa foi ensaiada. Este fato pode estar relacionado ao modo com

que o tempo de escoamento foi obtido: em geral, este tempo é cronometrado no momento de realização do ensaio; neste estudo, porém, os ensaios foram gravados e os tempos de escoamento determinados por meio da filmagem, permitindo, assim, a minimização dos erros de medição.

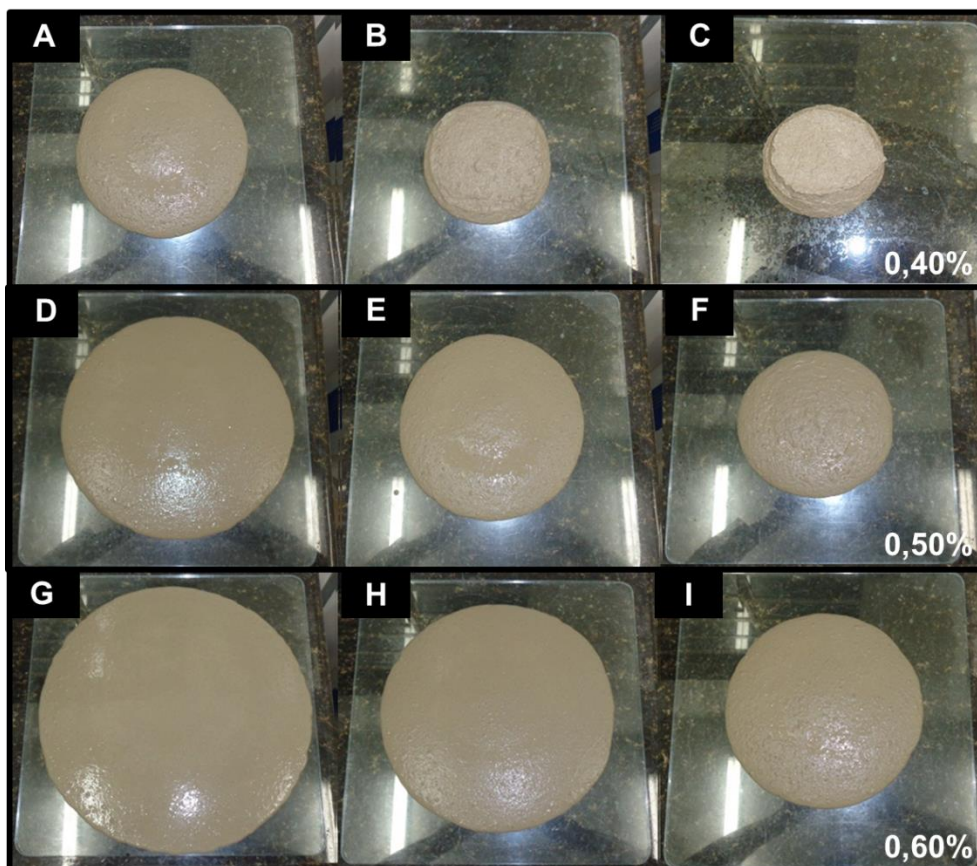
Os resultados dos ensaios de mini-espalhamento e mini-funil V para a argamassa ARG-AMR são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Espalhamento e tempo de escoamento da argamassa ARG-AMR.

Teor de aditivo (%)	Espalhamento (mm)			Tempo de escoamento (s)		
	5 min	30 min	60 min	5 min	30 min	60 min
0,40	249	196	-	2,36	2,62	-
0,50	317	273	208	2,07	2,36	2,82
0,60	376	320	261	1,74	2,33	2,57

Na Figura 42 é ilustrado o aspecto visual da argamassa ARG-AMR.

Figura 42 – Aspecto visual do espalhamento da argamassa ARG-AMR: com 0,40% de aditivo (a) aos 5 min, (b) aos 30 min e (c) aos 60 min; com 0,50% de aditivo (d) aos 5 min, (e) aos 30 min e (f) aos 60 min; com 0,60% de aditivo (g) aos 5 min, (h) aos 30 min e (i) aos 60 min.



Ao analisar a Tabela 33 é possível notar que, para o teor de aditivo igual a 0,50%, os diâmetros de espalhamento aos 30 e 60 minutos enquadram-se na faixa proposta por Melo (2005). Novamente, os tempos de escoamento se apresentaram inferiores a 3,5 s.

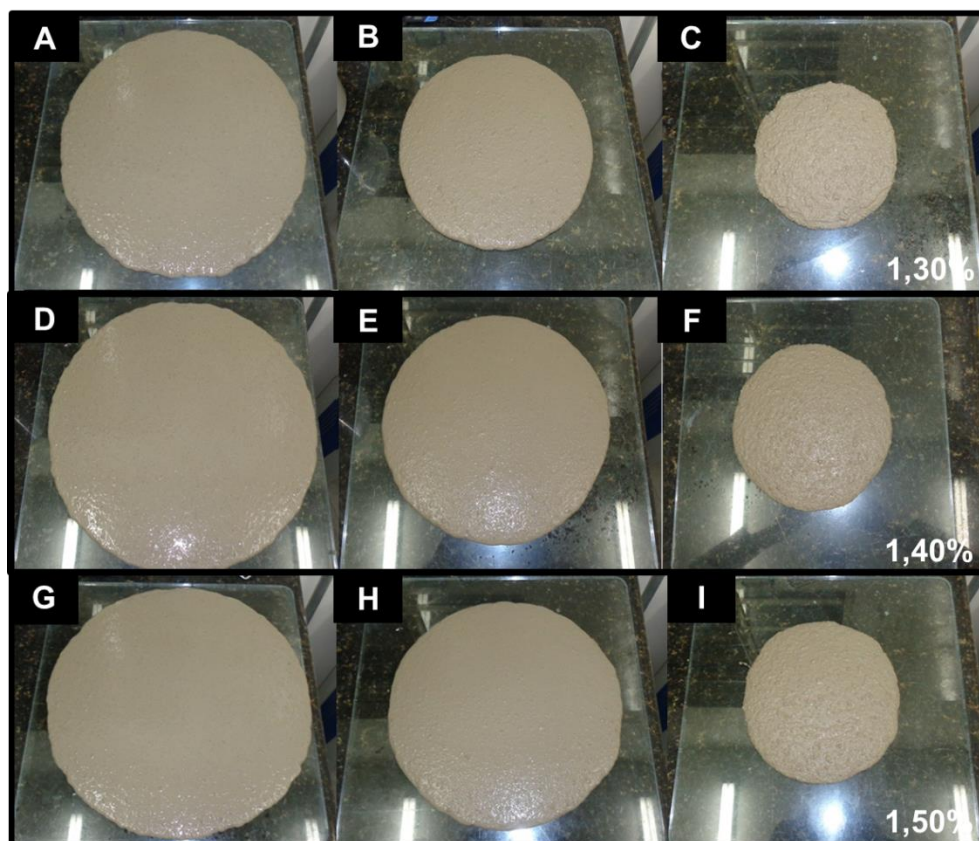
Os diâmetros médios de espalhamento e os tempos de escoamento da argamassa ARG-EMP-REF são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Espalhamento e tempo de escoamento da argamassa ARG-EMP-REF.

Teor de aditivo (%)	Espalhamento (mm)			Tempo de escoamento (s)		
	5 min	30 min	60 min	5 min	30 min	60 min
1,30	359	284	-	2,61	3,68	-
1,40	369	320	223	2,51	3,26	4,13
1,50	382	344	258	2,22	3,02	3,95

O aspecto visual da argamassa ARG-EMP-REF é ilustrado na Figura 43.

Figura 43 – Aspecto visual do espalhamento da argamassa ARG-EMP-REF: com 1,30% de aditivo (a) aos 5 min, (b) aos 30 min e (c) aos 60 min; com 1,40% de aditivo (d) aos 5 min, (e) aos 30 min e (f) aos 60 min; com 1,50% de aditivo (g) aos 5 min, (h) aos 30 min e (i) aos 60 min.



Mediante análise dos dados constantes na Tabela 34, verifica-se que aos 60 minutos, para o teor de 1,40% de aditivo, foi possível atender a ambos os limites sugeridos por Melo (2005). De fato, a argamassa ARG-EMP-REF se apresentou mais viscosa, como comprovam os resultados dos ensaios reológicos, o que, em geral, resulta em aumento no tempo de escoamento.

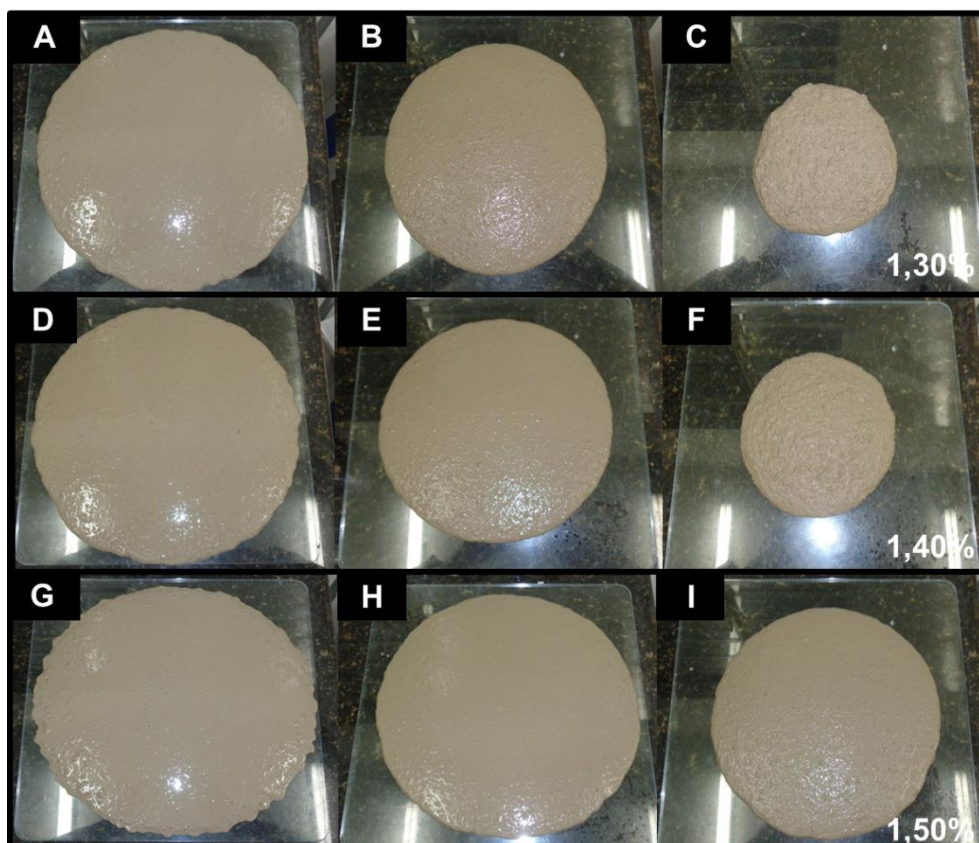
Por fim, são apresentados na Tabela 35 os resultados dos ensaios de mini-espalhamento e mini-funil V para a argamassa ARG-EMP-AMR.

Tabela 35 – Espalhamento e tempo de escoamento da argamassa ARG-EMP-REF.

Teor de aditivo (%)	Espalhamento (mm)			Tempo de escoamento (s)		
	5 min	30 min	60 min	5 min	30 min	60 min
1,30	374	294	-	2,59	3,18	-
1,40	377	339	264	2,39	3,17	4,17
1,50	390	374	285	2,27	2,72	3,69

Na Figura 44 é ilustrado o espalhamento da argamassa ARG-EMP-AMR.

Figura 44 – Aspecto visual do espalhamento da argamassa ARG-EMP-AMR: com 1,30% de aditivo (a) aos 5 min, (b) aos 30 min e (c) aos 60 min; com 1,40% de aditivo (d) aos 5 min, (e) aos 30 min e (f) aos 60 min; com 1,50% de aditivo (g) aos 5 min, (h) aos 30 min e (i) aos 60 min.



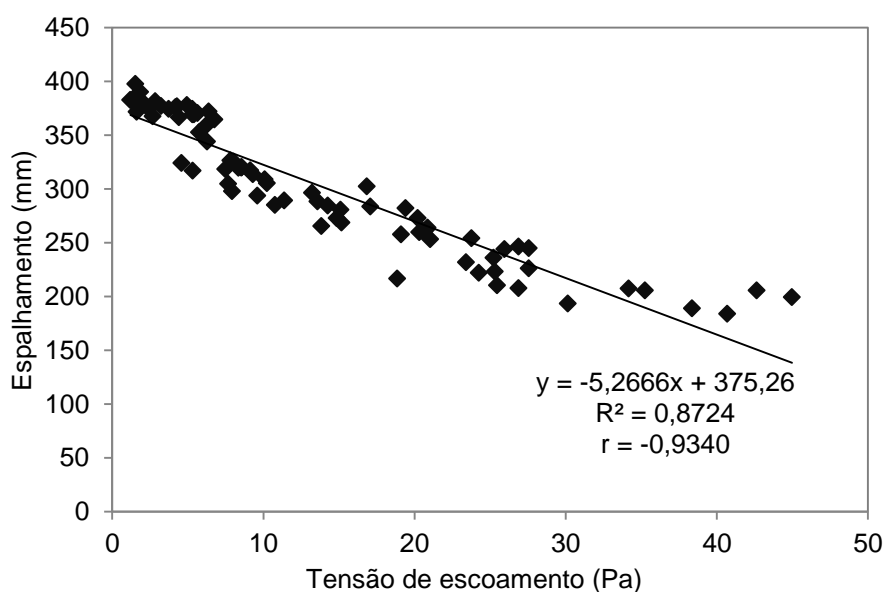
Ao analisar os dados apresentados na Tabela 35 é possível notar que o comportamento observado para a argamassa ARG-EMP-AMR, com 1,40% de aditivo superplastificante, foi análogo ao da argamassa ARG-EMP-REF, com teor similar de aditivo.

De modo geral, verifica-se que o critério proposto por Melo (2005) no estabelecimento de faixas de espalhamento e tempo de escoamento para argamassas autoadensáveis apresentou boa concordância com os resultados obtidos por meio dos ensaios reométricos. Deste modo, pode ser vislumbrada uma possível correlação entre os ensaios empíricos e os parâmetros reológicos, sendo este assunto tratado no tópico seguinte.

7.3.2.3 Correlações entre os parâmetros reológicos e os ensaios empíricos

Diversos estudos tentaram correlacionar os parâmetros reológicos dos materiais cimentícios com os resultados de ensaios empíricos, tais como o mini-espalhamento e o tempo de escoamento no mini-funil V (NOOR; UOMOTO, 2004; FELEKOGLU *et al.*, 2006; KWAN; FUNG; WONG, 2010; KWAN; FUNG, 2011; TURK, 2012). Em geral, relacionam-se o espalhamento com a tensão de escoamento e o tempo de escoamento com a viscosidade plástica. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 45 e 46.

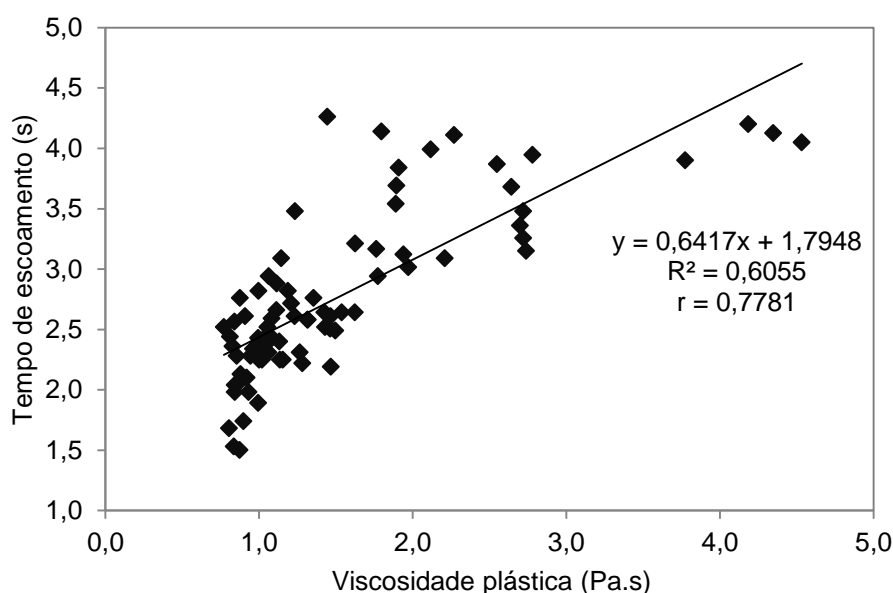
Figura 45 – Correlação entre a tensão de escoamento e o espalhamento das argamassas.



Ao analisar os resultados apresentados na Figura 45 nota-se que foi obtida forte correlação linear ($r = -0,9340$) entre a tensão de escoamento e o espalhamento das argamassas. Ainda é possível afirmar que, conforme a tensão de escoamento aumenta o espalhamento das argamassas diminui, sendo que tensão de escoamento explica 87,24% da variação do diâmetro de espalhamento. Tal relação também é relatada nos estudos de Noor e Uomoto (2004), Kwan, Fung e Wong (2010) e Kwan e Fung (2011).

No que tange a relação entre o tempo de escoamento e a viscosidade plástica foi observada uma correlação linear moderada ($r = 0,7781$) entre essas variáveis, como pode ser verificado na Figura 46.

Figura 46 – Correlação entre a viscosidade plástica e o tempo de escoamento das argamassas.



Ao analisar os dados constantes na Figura 46 não é possível estabelecer uma relação clara entre a viscosidade plástica o tempo de escoamento das argamassas, uma vez que o modelo explica apenas 60,55% da variabilidade do tempo de escoamento. De maneira geral, conforme o aumento da viscosidade plástica há acréscimo no tempo de escoamento. No entanto, neste estudo, foi observada grande dispersão dos resultados. Outros autores também verificaram uma correlação linear moderada entre o tempo de escoamento e a viscosidade. Felekoglu *et al.* (2006), por exemplo, obtiveram coeficiente de determinação igual a 0,708 ao correlacionar estas duas propriedades. Turk (2012) relata resultado similar, em que obteve coeficiente de determinação igual a 0,65. Os autores citados

anteriormente acreditam que os resultados verificados reflitam apenas uma tendência geral de correlação, em virtude do baixo coeficiente de determinação obtido.

Por fim, destaca-se que é possível que haja correlação entre os ensaios empíricos e os parâmetros reológicos das argamassas autoadensáveis. Tal relação ficou mais evidente no que diz respeito a tensão de escoamento e ao espalhamento. Por outro lado, não foi verificada boa correlação entre a viscosidade plástica e o tempo de escoamento. Deste modo, estudos mais aprofundados e abrangentes devem ser conduzidos para a confirmação de tais correlações.

7.3.3 Concretos

As propriedades dos concretos no estado fresco são apresentadas na Tabela 36.

Tabela 36 – Propriedades dos concretos no estado fresco.

Concreto	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)		Habilidade passante (H ₂ /H ₁)	Segregação (%)
		t ₅₀₀	t _v		
CAA-REF	655	1,32	3,00	0,87	9,50
CAA-AGR	690	0,63	2,49	0,85	4,61
CAA-AMR	670	0,60	2,74	0,84	12,83
CAA-AGMR	625	0,75	3,42	0,91	12,27
CAA-EMP-REF	660	0,81	2,28	0,83	13,68
CAA-EMP-AGR	625	0,90	2,64	0,92	2,69
CAA-EMP-AMR	650	0,39	2,73	0,91	11,99
CAA-EMP-AGMR	590	0,81	2,67	0,80	0,43

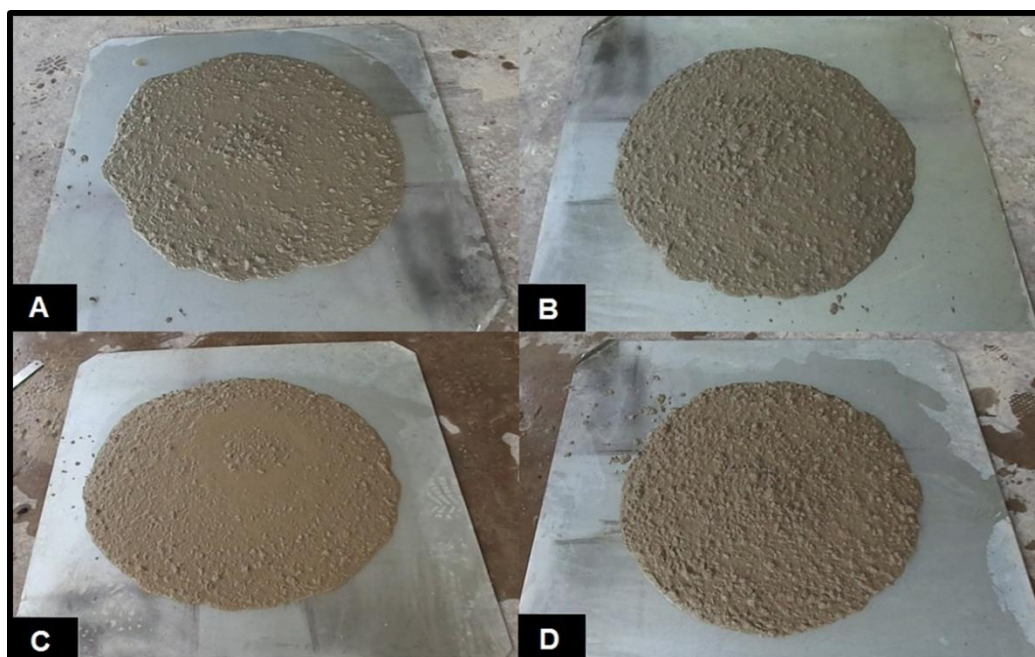
Ao analisar os resultados constantes na Tabela 36, é possível notar que todas as misturas atenderam plenamente aos limites normativos preconizados pela NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a). Cabe ressaltar que todas as composições apresentaram diâmetro de espalhamento dentro da faixa inicialmente proposta (650±65 mm). Com relação ao ensaio de espalhamento, verificou-se que os concretos produzidos se enquadraram em duas classes distintas de classificação, conforme indica a NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a), sendo os concretos CAA-AGMR, CAA-EMP-AGR, CAA-EMP-AMR e CAA-EMP-AGMR pertencentes à classe SF1 (de 550 a 650 mm) e os concretos CAA-REF, CAA-AGR, CAA-AMR e CAA-

EMP-REF classificados na categoria SF2 (de 660 a 750 mm). As variações constatadas no espalhamento são fruto do ajuste experimental do teor de aditivo superplastificante efetuado no momento da produção dos concretos. Nas Figuras 47 e 48 são apresentados os espalhamentos das composições de concreto estudadas.

Figura 47 – Espalhamento dos concretos: (a) CAA-REF; (b) CAA-AGR; (c) CAA-AMR e (d) CAA-AGMR.



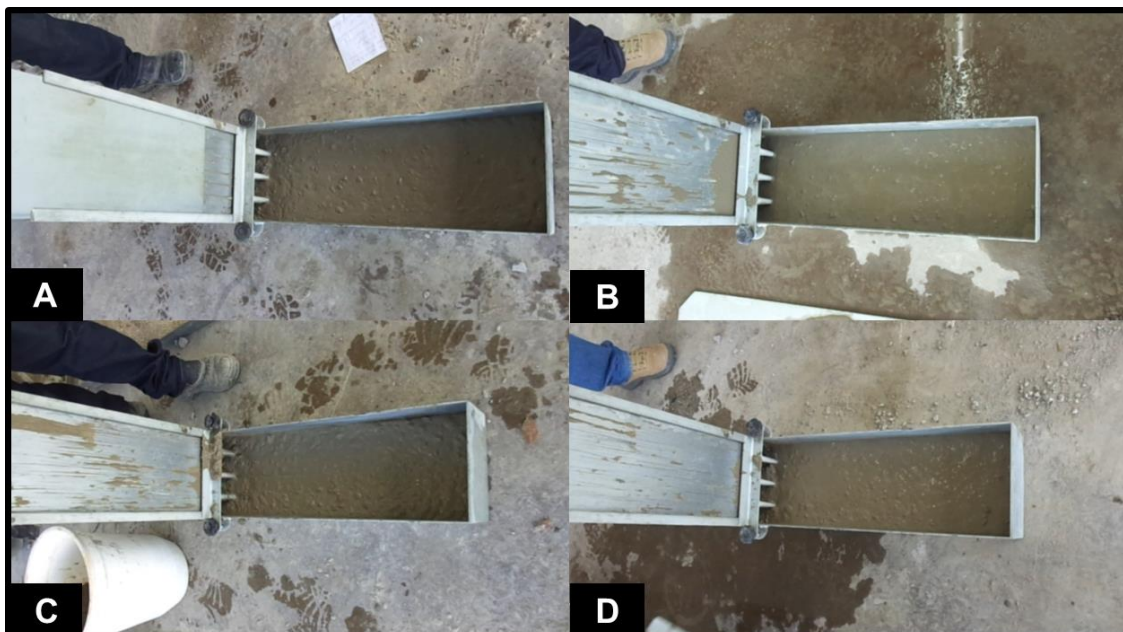
Figura 48 – Espalhamento dos concretos: (a) CAA-EMP-REF; (b) CAA-EMP-AGR; (c) CAA-EMP-AMR e (d) CAA-EMP-AGMR.



No que concerne ao parâmetro t_{500} , relacionado à viscosidade plástica aparente sob fluxo livre, notou-se que todos os concretos produzidos pertenceram a mesma classificação, VF1, de acordo com a NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a), com tempo de escoamento inferior a 2,0 s. No que diz respeito a avaliação da viscosidade plástica aparente sob fluxo confinado (ensaio do funil V), verificou-se que todas as misturas se enquadraram na classe VS1, segundo a referida norma, com tempo de escoamento (t_v) inferior a 9,0 s.

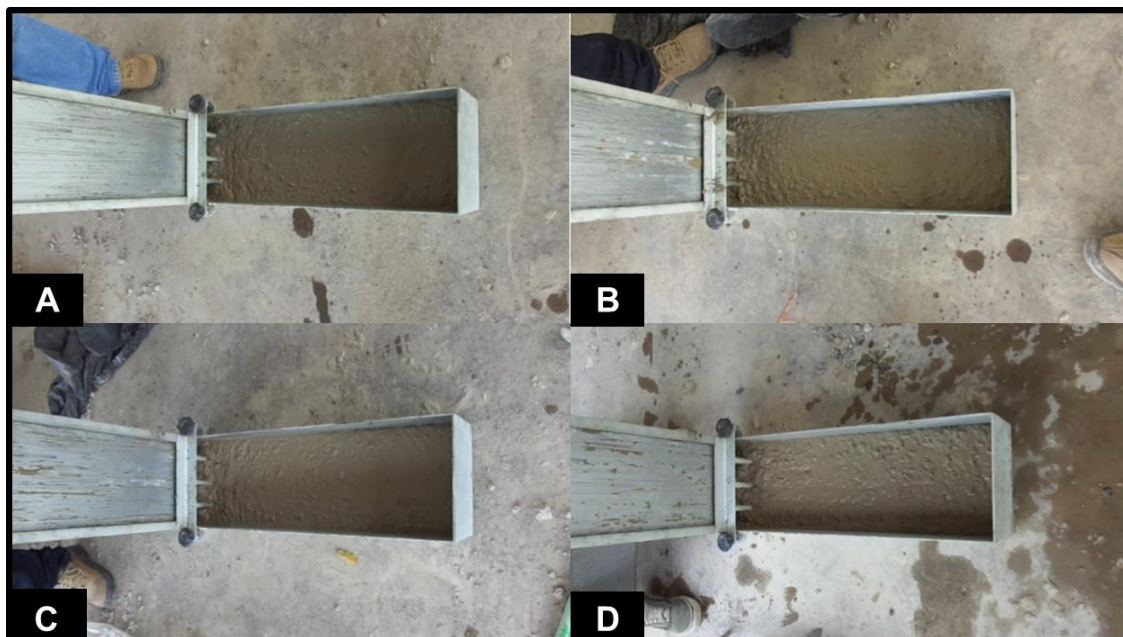
Com relação a habilidade passante (ensaio da caixa L), é possível notar que todas as composições atenderam aos requisitos normativos, ou seja, relação H_2/H_1 maior ou igual a 0,80, pertencendo a classe PL2, não apresentando bloqueio das partículas de agregado, conforme pode ser constatado nas Figuras 49 e 50.

Figura 49 – Habilidade passante dos concretos: (a) CAA-REF; (b) CAA-AGR; (c) CAA-AMR e (d) CAA-AGMR.



No que tange à segregação estática, verificou-se que todas as misturas apresentaram bom comportamento, apresentando segregação inferior a 15%, no ensaio da coluna de segregação, fazendo estas composições se enquadrarem na classe SR2 de segregação, segundo a classificação da NBR 15823-1:2010 (ABNT, 2010a).

Figura 50 – Habilidade passante dos concretos: (a) CAA-EMP-REF; (b) CAA- EMP-AGR; (c) CAA-EMP-AMR e (d) CAA- EMP-AGMR.



De maneira geral, é possível concluir que todos os concretos apresentaram comportamento adequado no estado fresco. No entanto, é importante ressaltar que houve a necessidade de efetuar ajustes no teor de aditivo superplastificante para que as misturas produzidas com agregados reciclados apresentassem as propriedades de autoadensabilidade requeridas. Verificou-se, então, que a incorporação dos agregados reciclados prejudica a fluidez das misturas. Fato este também observado na fase argamassa, conforme apresentado anteriormente. A redução na fluidez pode ser atribuída aos seguintes fatores: maior teor de materiais pulverulentos presente nos agregados reciclados, o que aumenta a demanda por água da mistura (TUYAN; MARDANI-AGHABAGLOU; RAMYAR, 2014; SILVA *et al.*, 2016); ao formato mais anguloso e textura rugosa das partículas, que contribuem para maior imbricamento e fricção entre os grãos (SAFIUDDIN; SALAM; JUMAAT, 2011; REVATHI; SELVI; VELIN, 2013); a maior absorção de água destes agregados, quando comparados aos agregados naturais, o que diminui a água livre disponível na mistura (REVATHI; SELVI; VELIN, 2013; PEREIRA-DE-OLIVEIRA *et al.*, 2014; CARRO-LÓPEZ *et al.*, 2015).

As propriedades dos concretos no estado fresco também foram determinadas após 30 e 60 minutos, contados a partir da incorporação do aditivo

superplastificante às misturas. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 37 e 38.

Tabela 37 – Propriedades dos concretos no estado fresco após 30 minutos da incorporação do aditivo superplastificante.

Concreto	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)		Habilidade passante (H_2/H_1)
		t_{500}	t_v	
CAA-REF	555	3,72	6,51	0,63
CAA-AGR	570	2,13	4,05	0,45
CAA-AMR	565	2,03	6,75	0,80
CAA-AGMR	400	-	bloqueio	bloqueio
CAA-EMP-REF	470	-	bloqueio	bloqueio
CAA-EMP-AGR	270	-	bloqueio	bloqueio
CAA-EMP-AMR	400	-	bloqueio	bloqueio
CAA-EMP-AGMR	460	-	bloqueio	bloqueio

Tabela 38 – Propriedades dos concretos no estado fresco após 60 minutos da incorporação do aditivo superplastificante.

Concreto	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)		Habilidade passante (H_2/H_1)
		t_{500}	t_v	
CAA-REF	380	-	bloqueio	bloqueio
CAA-AGR	385	-	bloqueio	bloqueio
CAA-AMR	435	-	bloqueio	bloqueio
CAA-AGMR	0	-	bloqueio	bloqueio
CAA-EMP-REF	275	-	bloqueio	bloqueio
CAA-EMP-AGR	0	-	bloqueio	bloqueio
CAA-EMP-AMR	285	-	bloqueio	bloqueio
CAA-EMP-AGMR	345	-	bloqueio	bloqueio

Mediante análise dos dados constantes nas Tabelas 37 e 38, é possível notar que, com exceção dos concretos CAA-REF, CAA-AGR e CAA-AMR, todas as composições perderam as características de autoadensabilidade após 30 minutos da incorporação do aditivo superplastificante. Decorridos 60 minutos, nenhuma das misturas produzidas pode ser classificada como autoadensável. O espalhamento foi a única propriedade medida em todos os tempos, mesmo que não estivesse no intervalo característico para concretos autoadensáveis (550 a 850 mm). O tempo de escoamento t_{500} foi determinado no caso das misturas que apresentaram espalhamento maior ou igual a 500 mm. Tentou-se determinar o tempo de escoamento no funil V e a habilidade passante das misturas, no entanto, na maioria

dos casos, foi constatado bloqueio durante a realização destes ensaios. A perda da fluidez das misturas pode estar relacionada com o processo de hidratação do cimento, a perda de eficiência do aditivo superplastificante e também com a absorção da matriz cimentícia pelos agregados, em especial os agregados reciclados. Melo (2005) observou tendência similar ao analisar as propriedades no estado fresco de concretos autoadensáveis ao longo do tempo, verificando a perda da autoadensabilidade após 30 minutos da incorporação do aditivo superplastificante as misturas.

7.4 Propriedades no estado endurecido

7.4.1 Resistência à compressão axial

Os resultados obtidos de resistência à compressão, para os concretos dosados pelo método de Repette-Melo, são apresentados na Tabela 39. Os valores individuais por corpo de prova podem ser consultados no Apêndice A.

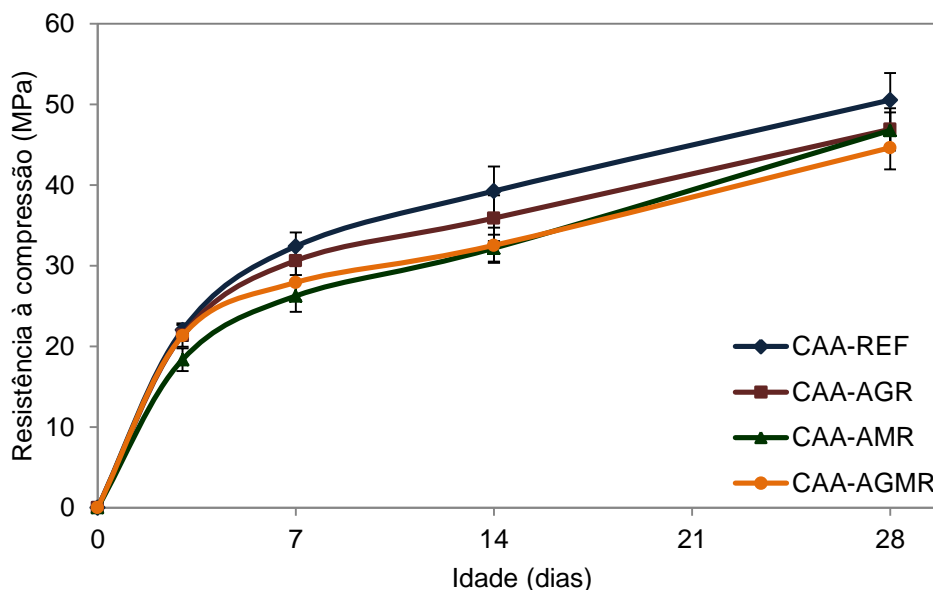
Tabela 39 – Resistência à compressão dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

Idade (dias)	CAA-REF fcm ± SD (MPa)	CAA-AGR fcm ± SD (MPa)	CAA-AMR fcm ± SD (MPa)	CAA-AGMR fcm ± SD (MPa)
3	23,03 ± 0,61	21,41 ± 1,44	18,37 ± 1,41	21,33 ± 0,65
7	32,41 ± 1,73	30,63 ± 1,77	26,25 ± 1,97	27,93 ± 2,21
14	39,26 ± 3,06	35,90 ± 2,83	32,18 ± 1,66	32,53 ± 2,18
28	50,55 ± 3,34	46,91 ± 2,62	46,78 ± 2,24	44,64 ± 2,67

fcm = resistência à compressão média; SD = desvio-padrão.

A evolução da resistência à compressão ao longo do tempo é ilustrada na Figura 51.

Figura 51 – Evolução da resistência à compressão dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.



Por meio dos dados constantes na Tabela 39 e na Figura 51 é possível notar que houve ganho de resistência à compressão para todos os concretos ao longo do tempo. Verifica-se, ainda, que em todos os casos e idades, os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram resistência à compressão inferior a do concreto REF. Aos 3 dias, foi observada uma ligeira redução na resistência média à compressão das misturas AGR e AGMR, de 2,81 e 3,18%, respectivamente, em comparação ao concreto de referência. No entanto, o concreto AMR apresentou queda de 16,64% desta propriedade em relação ao desempenho do traço REF. Aos 7 dias, foi verificada maior redução na resistência à compressão das composições AMR e AGMR, 19,00 e 13,84%, respectivamente, quando comparadas à mistura de referência. Novamente, o traço AGR exibiu menor queda na resistência à compressão, sendo observada uma diferença de 5,49% em relação ao concreto de referência. A mesma tendência de redução verificada aos 7 dias foi observada aos 14 dias de idade, sendo que o concreto AGR apresentou redução de 8,55%, em relação do concreto de referência, enquanto as misturas AMR e AGMR exibiram queda de 18,04 e 17,14%, nesta ordem. Aos 28 dias de idade, a redução média da resistência à compressão foi igual a 7,19, 7,45 e 11,69%, para os concretos AGR, AMR e AGRM, respectivamente, em comparação com o concreto REF.

De maneira geral, a literatura aponta redução na resistência à compressão de concretos autoadensáveis produzidos com substituição dos agregados naturais por reciclados. Carro-López *et al.* (2015), por exemplo, verificaram queda de 8 a 47% na resistência à compressão de CAA's produzidos com agregado miúdo reciclado em teores de substituição de 20 a 100%. Silva *et al.* (2016) observaram redução na resistência à compressão entre 15 e 29%, em concretos autoadensáveis com substituição de 25 a 100% da brita natural por agregado graúdo reciclado. Por outro lado, Grdic *et al.* (2010) não verificaram decréscimo significativo na resistência à compressão de concretos autoadensáveis produzidos com substituição de 50 e 100% da fração graúda natural por brita reciclada. Fakitsas *et al.* (2011) relataram ligeiro aumento na resistência à compressão de um CAA produzido com 100% de agregado graúdo reciclado. Os autores atribuíram o aumento da resistência à cura interna, propiciada pelas partículas de cimento anidro presentes nos agregados reciclados.

A redução da resistência à compressão em concretos que empregaram agregados reciclados é atribuída às propriedades intrínsecas desses agregados, ou seja, maior absorção de água, menor massa específica e unitária e menor resistência mecânica, quando comparados aos agregados naturais. Tais características são fruto da presença de fissuras transversais nos agregados reciclados, devido ao processo de produção destes e também da pasta de cimento porosa aderida às suas partículas (GRDIC *et al.*, 2010; BEHERA *et al.*, 2014; ZHAO *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016). Silva *et al.* (2016) também destacam que as características da antiga zona de transição dos agregados reciclados interferem diretamente no comportamento mecânico do concreto produzido com estes agregados, uma vez que podem ocorrer maiores concentrações de tensões nesses pontos quando o material é submetido ao carregamento, levando o material nesta região à falha.

A resistência à compressão dos concretos dosados por meio da aplicação do conceito de empacotamento de partículas é apresentada na Tabela 40.

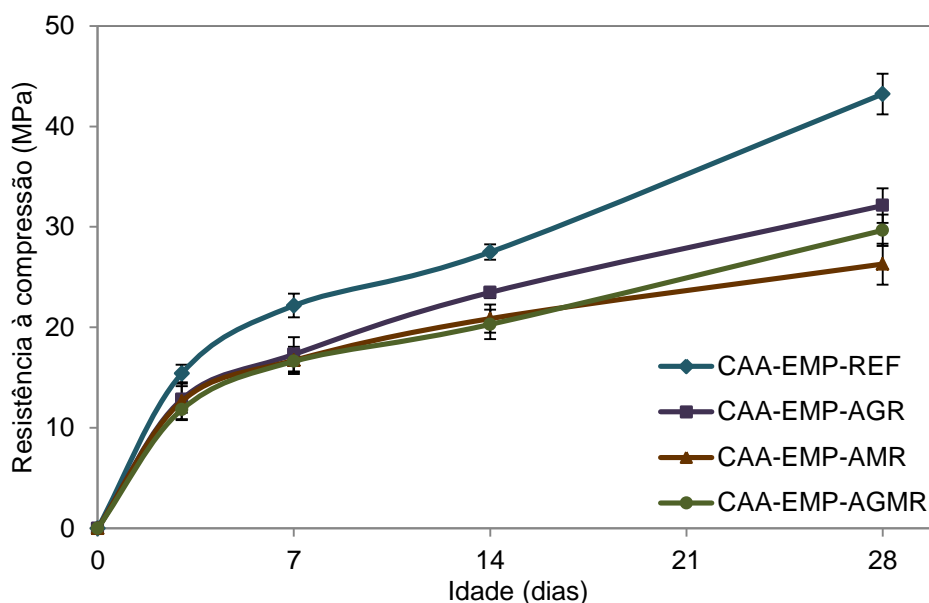
Tabela 40 – Resistência à compressão dos concretos dosados com base no empacotamento de partículas.

Idade (dias)	CAA-EMP-REF	CAA-EMP-AGR	CAA-EMP-AMR	CAA-EMP-AGMR
	fcm ± SD (MPa)	fcm ± SD (MPa)	fcm ± SD (MPa)	fcm ± SD (MPa)
3	15,41 ± 0,88	12,83 ± 1,33	12,65 ± 1,78	11,82 ± 1,04
7	22,17 ± 1,18	17,32 ± 1,70	16,73 ± 1,35	16,62 ± 1,10
14	27,50 ± 0,76	23,48 ± 0,56	20,87 ± 1,40	20,30 ± 1,46
28	43,22 ± 2,02	32,12 ± 1,71	26,30 ± 2,04	29,66 ± 1,57

fcm = resistência à compressão média; SD = desvio-padrão.

Na Figura 52 é ilustrada a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo para as composições de concreto dosadas por meio de empacotamento de partículas.

Figura 52 – Evolução da resistência à compressão dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

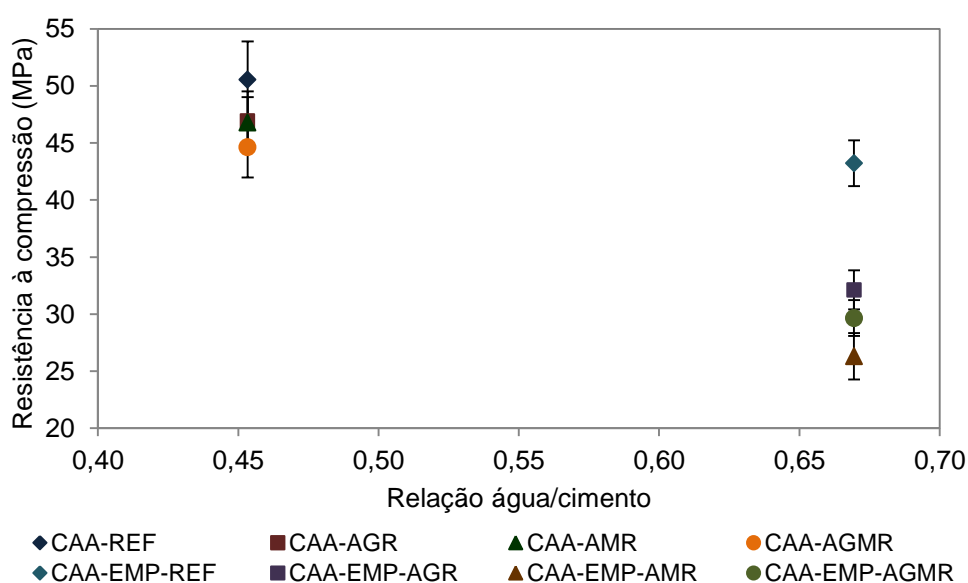


Mediante análise dos dados constantes na Tabela 40 e na Figura 52, é possível perceber que os concretos produzidos com agregados reciclados e dosados com aplicação do conceito de empacotamento de partículas também apresentaram redução na resistência à compressão, em todas as idades, em comparação ao traço de referência. Aos 3 dias, houve redução da resistência à compressão em 16,72, 17,91 e 30,37% para os concretos EMP-AGR, EMP-AMR e EMP-AGMR, respectivamente, quando comparados à mistura EMP-REF. Aos 7 dias, as composições EMP-AGR, EMP-AMR e EMP-AGMR apresentaram resistência à

compressão inferior a 21,88, 24,55 e 25,02%, nesta ordem, em relação ao traço de controle. Comportamento similar foi verificado aos 14 dias, sendo a queda deste parâmetro igual a 14,60, 24,08 e 26,17%, para os traços EMP-AGR, EMP-AMR e EMP-AGMR, respectivamente. Aos 28 dias foram observadas as maiores diferenças entre os concretos produzidos com agregados reciclados e a mistura de referência, sendo esta de 25,68% para o traço EMP-AGR, 39,14% para o concreto EMP-AMR e 31,38% para a composição EMP-AGMR.

A redução na resistência à compressão provocada pela incorporação de agregados reciclados ao concreto é atribuída às propriedades intrínsecas do material, já elencadas anteriormente. No entanto, é possível observar que houve uma diminuição mais pronunciada na resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados pelo conceito de empacotamento de partículas do que daqueles pelo método de Repette-Melo. Tal fato pode ser explicado pela maior relação água/cimento (a/c) dos concretos dosados por empacotamento de partículas. Estudos anteriores (CABRAL *et al.*, 2012; ANDREU; MIREN, 2014) verificaram menor influência na redução das propriedades mecânicas em concretos produzidos com agregados reciclados com menor relação água/cimento do que naqueles em que este parâmetro é maior. Neste sentido, são apresentados os dados na Figura 53.

Figura 53 – Influência da relação água/cimento na resistência à compressão dos concretos.



Apesar de ter sido verificada queda da resistência à compressão nos concretos produzidos com agregados reciclados, é necessário avaliar se tal redução é significativa ou não. Deste modo, foi efetuado o tratamento estatístico dos dados, por meio de análise de variância (ANOVA) e aplicação do teste de Tukey. Os resultados obtidos são apresentados em seção própria.

7.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo está sintetizada na Tabela 41. Nessa seção, os valores apresentados são referentes às médias de seis corpos de prova, por traço e por idade. Os dados individuais são apresentados no Apêndice A.

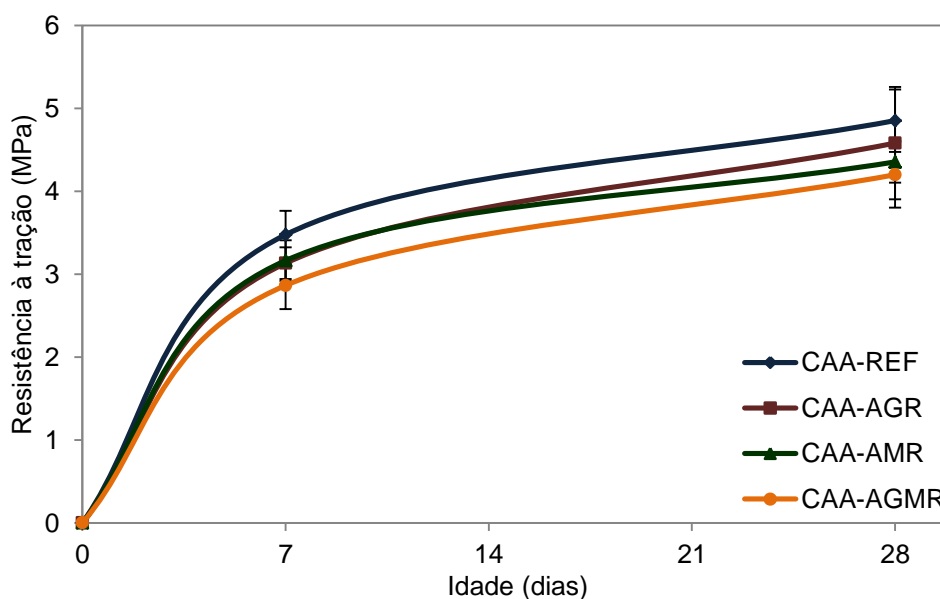
Tabela 41 – Resistência à tração dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

Idade (dias)	CAA-REF	CAA-AGR	CAA-AMR	CAA-AGMR
	ftm ± SD (MPa)	ftm ± SD (MPa)	ftm ± SD (MPa)	ftm ± SD (MPa)
7	3,48 ± 0,29	3,13 ± 0,19	3,16 ± 0,25	2,86 ± 0,28
28	4,85 ± 0,38	4,58 ± 0,68	4,35 ± 0,25	4,20 ± 0,40

ftm = resistência à tração média; SD = desvio-padrão.

A evolução da resistência à tração é apresentada na Figura 54.

Figura 54 – Evolução da resistência à tração dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.



Ao analisar os dados constantes na Tabela 41 e na Figura 54 é possível constatar que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram diminuição na resistência à tração, em comparação ao traço de referência, nas duas idades analisadas. Aos 7 dias, houve redução na resistência à tração em 9,88, 8,97 e 17,60%, nas misturas AGR, AMR e AGMR, respectivamente, em relação ao concreto REF. Aos 28 dias, o concreto AGR apresentou resistência à tração 5,60% inferior à mistura de controle. As composições AMR e AGMR exibiram maior redução deste parâmetro, sendo observada uma diferença igual a 10,27 e 13,47%, nesta ordem, em relação ao CAA-REF. A redução da resistência à tração também é reflexo das propriedades intrínsecas dos agregados reciclados, já elencadas anteriormente.

Resultados apresentados na literatura também relataram a diminuição na resistência à tração em concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados. Señas, Priano e Marfil (2016) observaram queda de apenas 2,27% na resistência à tração de um concreto autoadensável com substituição de 50% da brita natural por agregado graúdo reciclado. Em outra composição, que empregou 50% de agregado graúdo reciclado e 20% de areia reciclada, os mesmos autores verificaram redução de 11,36% na resistência à tração. Grdic *et al.* (2010) também observaram reduções de 2,49 e 13,95% na resistência à tração na flexão de concretos autoadensáveis produzidos com substituição de 50 e 100%, respectivamente, dos agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto. Gesoglu *et al.* (2015) apontaram queda de 7,4 a 17,6% na resistência à tração de CAA's produzidos com 100% de agregado graúdo reciclado. Os mesmos autores ainda relataram redução entre 19,5 e 27,7% na resistência à tração de concretos autoadensáveis produzidos com substituição total da areia natural por agregado miúdo reciclado.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), as resistências à compressão e à tração estão intimamente relacionadas, uma vez que à medida que a resistência à compressão aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a uma velocidade decrescente. Os mesmos autores ainda afirmam que a relação resistência à tração/compressão deve estar compreendida no intervalo de 7 e 11%. Nesse sentido, a relação resistência à tração/resistência à compressão variou entre 10,22 e 12,05% nos concretos dosados pelo método de Repette-Melo, aos 7 dias, e entre 9,31 e 9,76%, aos 28 dias. Neville (2016) aponta que a relação resistência à

tração/resistência à compressão também é influenciada pela idade do concreto, sendo que em idades mais avançadas esta relação é menor, conforme constatado neste trabalho.

A resistência à tração dos concretos dosados com aplicação do conceito de empacotamento de partículas é apresentada na Tabela 42.

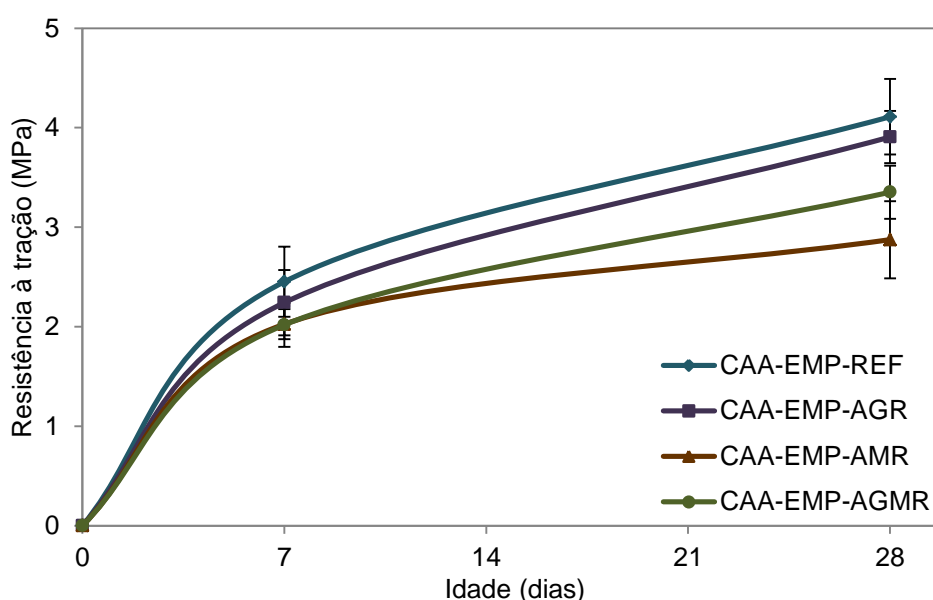
Tabela 42 – Resistência à tração dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

Idade (dias)	CAA-EMP-REF ftm ± SD (MPa)	CAA-EMP-AGR ftm ± SD (MPa)	CAA-EMP-AMR ftm ± SD (MPa)	CAA-EMP-AGMR ftm ± SD (MPa)
7	2,45 ± 0,35	2,24 ± 0,33	2,03 ± 0,15	2,02 ± 0,22
28	4,11 ± 0,38	3,91 ± 0,26	2,88 ± 0,39	3,35 ± 0,27

ftm = resistência à tração média; SD = desvio-padrão.

Na Figura 55 está ilustrado o ganho de resistência à tração ao longo do tempo.

Figura 55 – Evolução da resistência à tração dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.



Ao analisar os dados constantes na Tabela 42 e na Figura 55, é possível observar que os concretos que empregaram agregados reciclados apresentaram resistência à tração inferior ao concreto de referência, em ambas as idades analisadas. Aos 7 dias, os concretos EMP-AMR e EMP-AGMR exibiram queda de

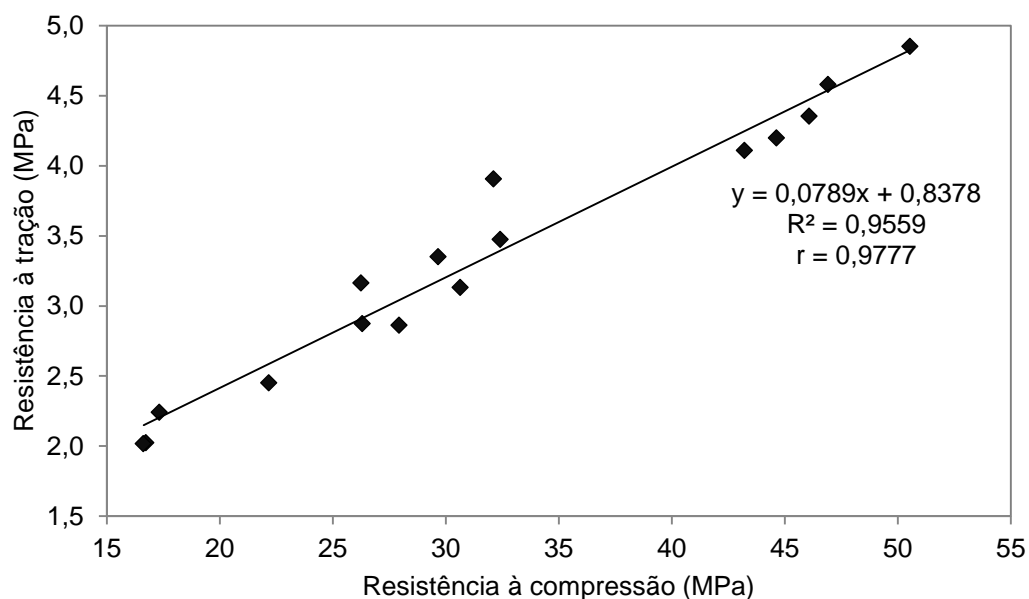
17,40 e 17,68%, respectivamente, desta propriedade, em comparação ao concreto EMP-REF. Já a mistura EMP-AGR apresentou uma redução menor na resistência à tração, sendo esta igual a 8,57%. Aos 28 dias, o desempenho das misturas EMP-AMR e EMP-AGMR também foi inferior ao do concreto de referência, sendo constatada redução de 30,05 e 18,45%, respectivamente. A mesma tendência de comportamento observada aos 7 dias para o concreto EMP-AGR foi verificada aos 28 dias, sendo que esta mistura apresentou queda de apenas 4,95% na resistência à tração, em relação ao traço EMP-REF.

As relações entre resistência à tração e resistência à compressão para os concretos dosados com aplicação do conceito de empacotamento de partículas variaram entre 11,06 e 12,94%, aos 7 dias, e entre 9,51 e 12,16% aos 28 dias. Observa-se que tais relações são ligeiramente maiores do que o intervalo proposto por Metha e Monteiro (2014). Alguns autores (FELEKOGU *et al.*, 2007; ASLANI; NEJADI, 2012) relataram que a resistência à tração de concretos autoadensáveis tende a ser ligeiramente maior do que àquela observada para concretos convencionais, em virtude da melhor aderência entre a pasta de cimento e os agregados.

Recentemente, Gesoglu *et al.* (2015) verificaram que existe uma correlação entre a resistência à compressão e resistência à tração para concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados. Os autores citados anteriormente obtiveram forte correlação linear ($r = 0,9636$ e $R^2 = 0,9285$) entre as resistências à compressão e à tração. Tal correlação também foi observada no presente estudo e é apresentada na Figura 56.

Ao analisar a Figura 56, observa-se forte correlação linear entre as resistências à compressão e à tração nos concretos estudados, ou seja, a inserção de agregados reciclados não alterou a tendência de comportamento esperada para os concretos produzidos somente com agregados naturais. De modo geral, o comportamento da resistência à tração dos concretos com agregados reciclados foi similar ao observado para a resistência à compressão. O tratamento estatístico dos dados é apresentado em seção própria.

Figura 56 – Correlação entre resistência à compressão e resistência à tração dos concretos.



7.4.3 Módulo de elasticidade estático

O módulo de elasticidade dos concretos produzidos, por ambos os métodos de dosagem, é apresentado na Tabela 43. Os valores referem-se às médias apresentadas por seis corpos de prova, ensaiados aos 28 dias de idade. Os dados individuais podem ser consultados no Apêndice A.

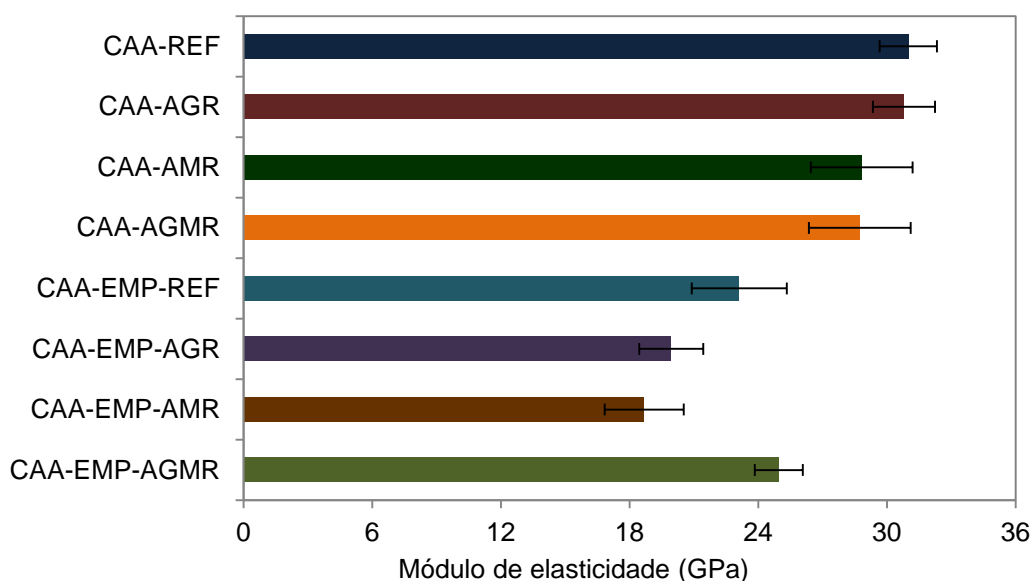
Tabela 43 – Módulo de elasticidade dos concretos.

Composição	$E_{cm} \pm SD$ (GPa)
CAA-REF	$31,00 \pm 1,34$
CAA-AGR	$30,80 \pm 1,45$
CAA-AMR	$28,83 \pm 2,37$
CAA-AGMR	$28,73 \pm 2,37$
CAA-EMP-REF	$23,12 \pm 2,22$
CAA-EMP-AGR	$19,95 \pm 1,50$
CAA-EMP-AMR	$18,68 \pm 1,85$
CAA-EMP-AGMR	$24,65 \pm 1,64$

E_{cm} = módulo de elasticidade médio; SD = desvio-padrão.

Na Figura 57 é apresentada a representação gráfica dos resultados obtidos.

Figura 57 – Módulo de elasticidade dos concretos.



Mediante análise dos resultados constantes na Tabela 43 e na Figura 57, notam-se comportamentos distintos, uma vez que o módulo de elasticidade de algumas misturas não sofreu grande prejuízo com a incorporação dos agregados reciclados, ao passo que, para outras composições foi verificado decréscimo expressivo desta propriedade. Os concretos AMR e AGMR apresentaram redução no módulo de elasticidade de 7,01 e 7,31%, respectivamente, em comparação ao concreto de referência. O módulo de elasticidade dos concretos REF e AGR é, praticamente, o mesmo. Por outro lado, as composições EMP-AGR e EMP-AMR exibiram grande redução desta propriedade, sendo o módulo de elasticidade destas misturas 13,71 e 19,18%, respectivamente, inferior ao do concreto EMP-REF. Um comportamento anômalo foi observado para o concreto EMP-AGMR, que apresentou aumento de 6,23% no módulo de elasticidade em relação ao concreto EMP-REF.

O módulo de elasticidade do concreto é dependente do módulo de elasticidade dos agregados. Deste modo, quando há incorporação de agregados reciclados, que possuem menor módulo de elasticidade do que os agregados naturais, é esperada redução dessa propriedade no compósito. De Brito e Saikia (2012) ressaltam que os agregados reciclados prejudicam a rigidez do concreto, o que resulta em diminuição no módulo de elasticidade.

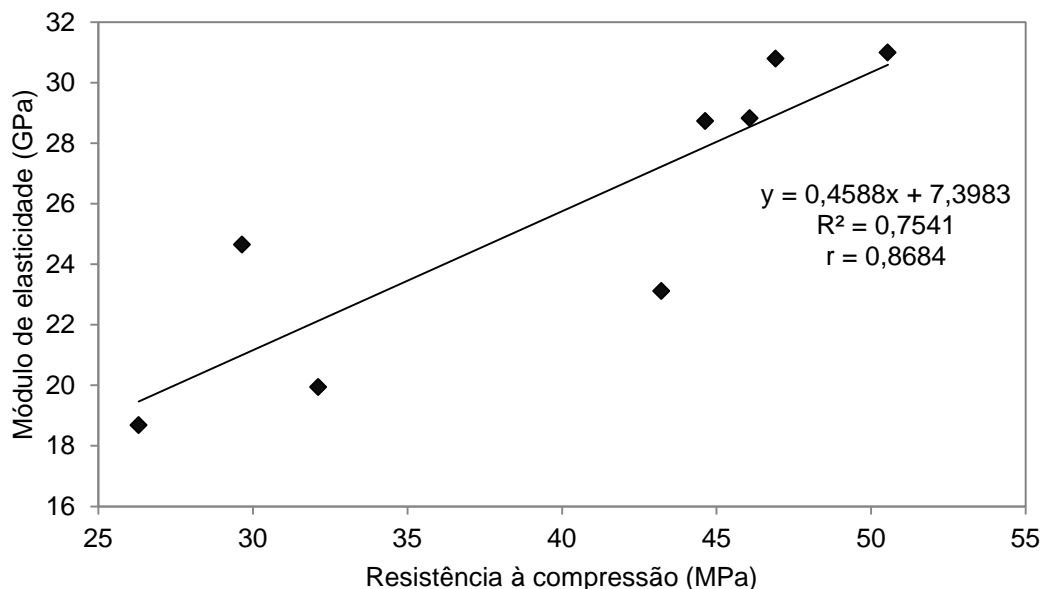
De modo geral, os resultados apresentados na literatura apontam para a redução no módulo de elasticidade em concretos produzidos com agregados

reciclados. Gesoglu *et al.* (2015) relataram a diminuição desta propriedade de 13,12 a 18,42% em concretos autoadensáveis produzidos com substituição total dos agregados graúdos naturais pelos correspondentes agregados reciclados. Os mesmos autores verificaram redução ainda maior, de 22,52 a 24,57%, nas composições onde foi empregado agregado miúdo reciclado em substituição total a areia natural.

Por outro lado, Manzi, Mazzotti e Bignozzi (2014) observaram incremento na resistência à compressão e no módulo de elasticidade em concretos autoadensáveis produzidos com agregados miúdos e graúdos reciclados em substituição aos agregados naturais, em teores de 25 e 40%, em volume. Os autores acreditam que a melhoria observada no comportamento mecânico é devida a melhor aderência entre a pasta de cimento e a argamassa aderida nas partículas dos agregados reciclados. Pereira-de-Oliveira *et al.* (2014), observaram pequena redução no módulo de elasticidade de concretos autoadensáveis produzidos com substituição de 20 e 40% da brita natural por agregados graúdos reciclados. Quando houve substituição total do agregado graúdo natural por reciclado, o módulo de elasticidade apresentou queda de 7,5%, em relação à mistura de controle. De acordo com os autores citados anteriormente, a menor influência dos agregados graúdos reciclados no módulo de elasticidade de concretos autoadensáveis pode ser reflexo da menor fração de agregado graúdo utilizada nesse tipo de concreto, em comparação com o concreto convencional. Por conta deste fato, a incorporação de agregados graúdos reciclados no concreto autoadensável seria menos influente do que em concretos convencionais.

De acordo com Neville (2016), o módulo de elasticidade do concreto aumenta conforme o aumento na resistência à compressão, no entanto, o acréscimo no módulo de elasticidade é progressivamente menor do que o aumento na resistência à compressão. Gesoglu *et al.* (2015) verificaram a existência de correlação entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade para concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados. Tais autores obtiveram forte correlação linear ($r = 0,9439$ e $R^2 = 0,8909$) entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Os resultados obtidos neste estudo são apresentados na Figura 58.

Figura 58 – Correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos.



Apesar de ser observado um menor coeficiente de determinação ($R^2 = 0,7541$) entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, em comparação ao reportado por Gesoglu *et al.* (2015), ainda foi verificada boa correlação linear ($r = 0,8684$) entre essas propriedades. Tal fato sugere que os agregados reciclados influenciam de modo semelhante a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. As análises estatísticas são apresentadas em seção própria.

7.4.4 Absorção de água por imersão e índice de vazios

A absorção de água e o índice de vazios dos concretos estudados são apresentados na Tabela 44. Os valores apresentados são referentes às médias obtidas por quatro corpos de prova, ensaiados aos 28 dias de idade. Os dados individuais podem ser consultados no Apêndice A.

Tabela 44 – Absorção de água e índice de vazios dos concretos.

Composição	Absorção ± SD (%)	Índice de vazios ± SD (%)
CAA-REF	4,78 ± 0,36	11,20 ± 0,67
CAA-AGR	5,28 ± 0,30	12,17 ± 0,63
CAA-AMR	6,45 ± 0,63	14,81 ± 1,31
CAA-AGMR	6,52 ± 0,32	14,93 ± 0,79
CAA-EMP-REF	6,14 ± 0,70	14,08 ± 1,47
CAA-EMP-AGR	7,21 ± 0,59	16,25 ± 1,02
CAA-EMP-AMR	7,57 ± 0,16	16,88 ± 0,29
CAA-EMP-AGMR	7,12 ± 0,32	15,86 ± 0,62

SD = desvio-padrão.

Mediante análise dos dados apresentados na Tabela 44, é possível verificar que todos os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram maior absorção de água e índice de vazios do que os respectivos concretos de referência. Para os concretos dosados pelo método de Repette-Melo, houve incremento de 10,50, 34,98 e 36,53% na absorção de água dos concretos AGR, AMR e AGMR, respectivamente, em comparação com o concreto REF. Para os concretos dosados por meio do conceito de empacotamento de partículas, o aumento observado na absorção de água foi de 17,46, 19,83 e 13,02%, para as misturas EMP-AGR, EMP-AMR e EMP-AGMR, nesta ordem, em relação ao concreto EMP-REF.

Os resultados obtidos neste estudo vão ao encontro com àqueles reportados por Grdic *et al.* (2010), Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014) e Silva *et al.* (2016), que também observaram aumento na absorção de água em concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados. Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014), por exemplo, verificaram incremento de 19,2 a 32,1% na absorção de água de concretos produzidos com substituição parcial do agregado graúdo natural por reciclado, em teores de 20 a 60%. O aumento da absorção de água dos concretos está relacionado com a maior capacidade de absorção de água dos agregados reciclados, que é consequência de sua microestrutura porosa.

Segundo o *Comité Euro-International du Béton* – CEB (1989) a absorção de água do concreto pode ser relacionada com a sua qualidade: uma absorção menor do que 3,0% indica um material de boa qualidade e baixa absorção; concretos que apresentam índices de 3,0 a 5,0% são qualificados como de média absorção e qualidade; os que possuem absorção de água superior a 5,0% são

classificados como de alta absorção e baixa qualidade. Portanto, verifica-se que somente o concreto CAA-REF pode ser considerado de média absorção e qualidade, enquanto que os demais concretos produzidos se enquadraram na categoria de alta absorção e baixa qualidade, conforme a classificação proposta pelo CEB (1989).

Ainda em função da absorção de água, de acordo com Helene (1983), é possível classificar os concretos como duráveis (absorção menor que 4,2%), normais (absorção entre 4,2% e 6,3%) e deficientes (absorção maior que 6,3%). Segundo esse critério, os concretos CAA-REF, CAA-AGR e CAA-EMP-REF podem ser classificados como de durabilidade normal, ao passo que as demais misturas se enquadraram como de qualidade deficiente.

Neville (2016), por outro lado, acredita que a absorção de água não pode ser utilizada como um parâmetro de qualidade do concreto. No entanto, o autor destaca que a maioria dos bons concretos apresenta absorção de água inferior a 10%, em massa.

7.4.5 Massa específica

A massa específica no estado endurecido dos concretos estudados é apresentada na Tabela 45. Os resultados apresentados referem-se às médias de quatro corpos de prova, por traço. Os valores individuais podem ser consultados no Apêndice A.

Tabela 45 – Massa específica dos concretos.

Composição	Massa específica \pm SD (kg/m ³)		
	Seca	Saturada	Real
CAA-REF	2348,1 \pm 59,0	2460,1 \pm 55,9	2644,2 \pm 58,8
CAA-AGR	2307,0 \pm 14,7	2428,7 \pm 10,1	2626,7 \pm 10,5
CAA-AMR	2299,6 \pm 22,1	2447,7 \pm 10,3	2699,5 \pm 18,0
CAA-AGMR	2289,5 \pm 27,1	2438,8 \pm 31,4	2631,3 \pm 42,4
CAA-EMP-REF	2297,1 \pm 25,1	2437,9 \pm 10,5	2673,8 \pm 16,3
CAA-EMP-AGR	2259,6 \pm 47,2	2422,1 \pm 37,0	2697,6 \pm 23,5
CAA-EMP-AMR	2231,0 \pm 10,5	2399,8 \pm 8,50	2684,1 \pm 8,30
CAA-EMP-AGMR	2221,8 \pm 17,6	2380,0 \pm 18,3	2639,8 \pm 28,3

SD = desvio-padrão.

Mediante análise dos dados apresentados na Tabela 45, verifica-se que todos os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram massa específica seca inferior à dos concretos de referência. A diminuição dessa propriedade nos concretos dosados pelo método de Repette-Melo variou entre 1,75 e 2,50%, enquanto que, para os concretos dosados por empacotamento de partículas, a massa específica seca dos traços que empregaram agregados reciclados foi de 1,63 a 3,28% menor do que a do concreto EMP-REF.

A redução na massa específica dos concretos que empregaram agregados reciclados já era esperada e está relacionada as propriedades intrínsecas destes agregados, que lhe conferem menor massa específica do que os agregados naturais. Em geral, os resultados apontados na literatura vão ao encontro com o observado neste estudo. Silva *et al.* (2016), por exemplo, verificaram decréscimo de 1,08 a 5,50% na massa específica de concretos autoadensáveis produzidos com substituição parcial dos agregados graúdos naturais por reciclados, em teores de 25 a 100%. No trabalho de Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014), os autores observaram decréscimos mais sutis, variando de 0,63 a 1,72% na massa específica de concretos autoadensáveis produzidos com agregados graúdos reciclados, em teores de 20 a 60% de substituição.

7.4.6 Absorção de água por capilaridade

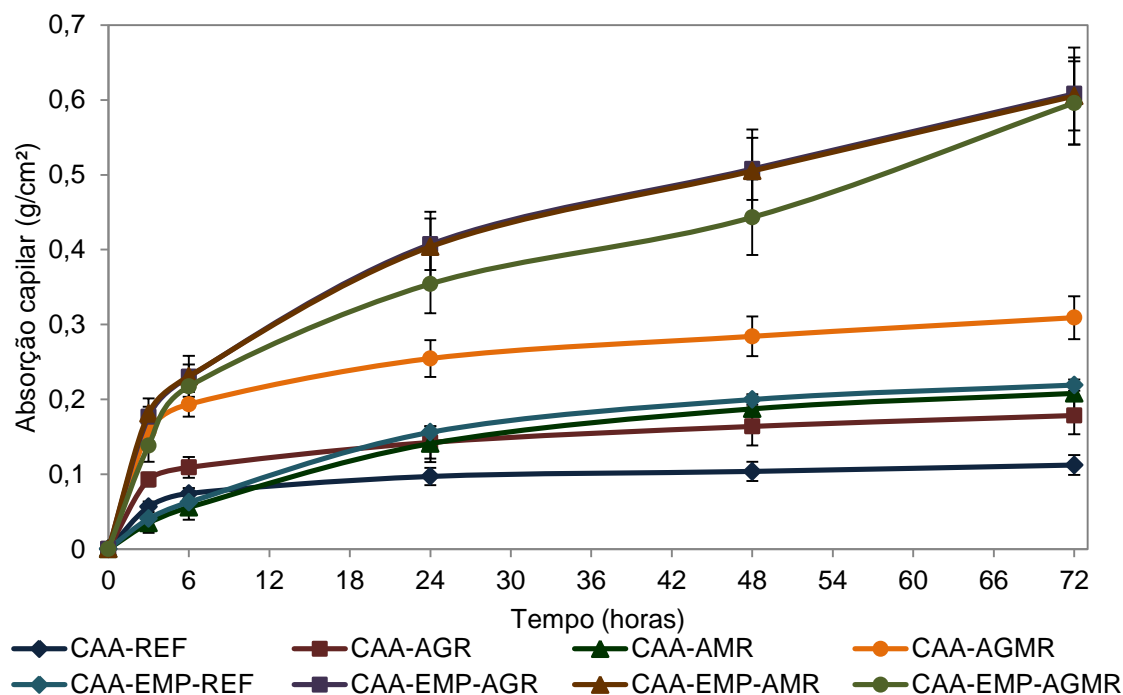
A absorção de água por capilaridade dos concretos foi avaliada após transcorridas 3, 6, 24, 48 e 72 horas do contato das amostras com a água. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 46, e referem-se às médias apresentadas por quatro corpos de prova, ensaiados aos 28 dias de idade.

Tabela 46 – Absorção de água por capilaridade dos concretos.

Composição	Absorção capilar \pm SD (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
CAA-REF	0,057 \pm 0,007	0,074 \pm 0,007	0,097 \pm 0,011	0,104 \pm 0,013	0,112 \pm 0,013
CAA-AGR	0,093 \pm 0,009	0,109 \pm 0,014	0,142 \pm 0,022	0,164 \pm 0,025	0,178 \pm 0,025
CAA-AMR	0,035 \pm 0,004	0,056 \pm 0,004	0,141 \pm 0,012	0,187 \pm 0,010	0,208 \pm 0,014
CAA-AGMR	0,157 \pm 0,013	0,193 \pm 0,016	0,255 \pm 0,025	0,284 \pm 0,027	0,309 \pm 0,029
CAA-EMP-REF	0,041 \pm 0,005	0,063 \pm 0,005	0,156 \pm 0,008	0,200 \pm 0,007	0,219 \pm 0,008
CAA-EMP-AGR	0,177 \pm 0,013	0,230 \pm 0,017	0,407 \pm 0,034	0,508 \pm 0,041	0,608 \pm 0,049
CAA-EMP-AMR	0,181 \pm 0,020	0,231 \pm 0,027	0,404 \pm 0,047	0,505 \pm 0,056	0,605 \pm 0,065
CAA-EMP-AGMR	0,138 \pm 0,022	0,217 \pm 0,019	0,354 \pm 0,039	0,443 \pm 0,050	0,596 \pm 0,056

A evolução da absorção capilar ao longo do tempo é apresentada na Figura 59.

Figura 59 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos.



Ao analisar os dados constantes na Tabela 46 e na Figura 59 é possível notar que todas as misturas com agregados reciclados exibiram maior absorção capilar do que os traços de referência. Este fato está relacionado a natureza mais porosa dos agregados reciclados, que altera a estrutura de poros do compósito cimentício. O aumento na absorção de água por capilaridade em concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados também é relatado por Kapoor, Singh e Singh (2016), que verificaram incremento de 9,3 e 39,5% na absorção capilar de concretos produzidos com 50 e 100% de agregados graúdos reciclados. Observa-se ainda que as misturas dosadas pelo método de Repette-Melo e o concreto EMP-REF apresentaram maiores ganhos na absorção capilar durante as primeiras 24 horas de ensaio. Os demais concretos, por outro lado, continuaram a absorver um montante expressivo de água por capilaridade até o término do ensaio, indicando, deste modo, maior porosidade e interconectividade dos poros no interior do concreto.

7.4.7 Análise estatística das propriedades mecânicas dos concretos

Esta seção é dedicada a análise estatística dos resultados obtidos pelos concretos, no que tange as propriedades mecânicas avaliadas aos 28 dias de idade. A análise estatística foi executada com auxílio do *software Minitab 17*. O tratamento dos dados se deu por meio de análise de variância (ANOVA), a fim de verificar se as médias obtidas pelos concretos com agregados reciclados diferiam estatisticamente dos concretos de referência, com nível de significância de 95%. Em caso de médias estatisticamente diferentes, o teste de Tukey foi aplicado. Na Tabela 47 é apresentada a ANOVA referente à resistência à compressão dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

Tabela 47 – ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

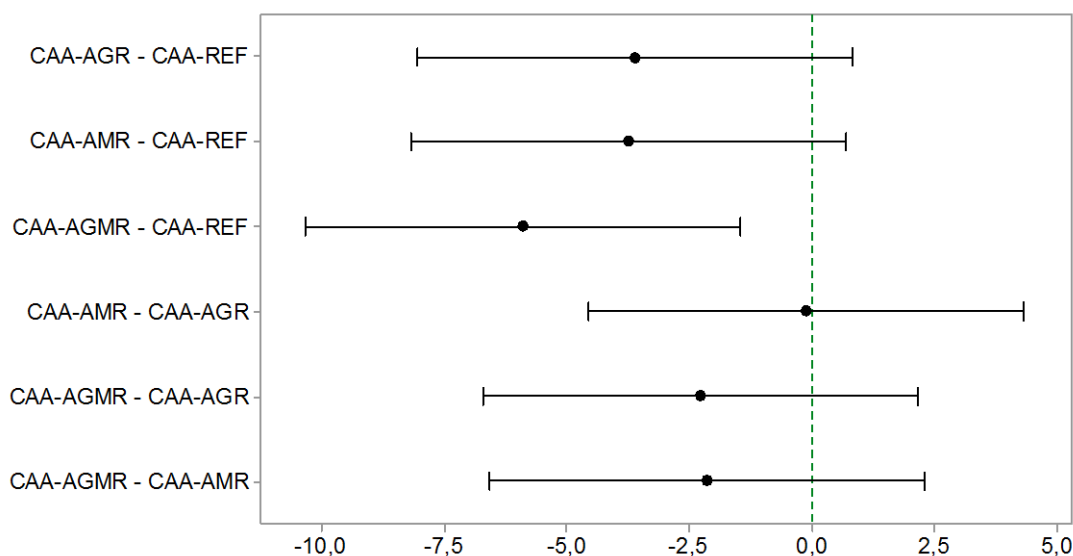
Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Médias quadradas	F	Valor p
Entre grupos	3	108,2	36,051	4,78	0,011
Dentro dos grupos	20	150,8	7,538		
Total	23	258,9			

Mediante análise dos dados constantes na Tabela 47 é possível verificar que o valor p é menor do que o nível de significância especificado ($\alpha = 0,05$). Deste modo, é verificado que existem diferenças significativas entre as resistências à compressão dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo. Assim, o teste de Tukey foi aplicado, sendo o resultado obtido apresentado na Figura 60.

Ao analisar os dados obtidos pelo teste de Tukey, é possível perceber que somente o concreto CAA-AGMR pode ser considerado estatisticamente diferente do concreto de referência. O pior desempenho dessa composição, frente às demais é atribuído ao maior teor de agregados reciclados empregado. Apesar de os concretos CAA-AGR e CAA-AMR terem apresentado redução na resistência à compressão, em comparação ao concreto de referência, esta diminuição não pode ser considerada significativa, com um nível de confiabilidade de 95%. Outro fator que chama atenção é a não-diferenciação estatística dos concretos CAA-AGR, CAA-AMR e CAA-AGMR. Tal fato sugere a possibilidade de aplicação em conjunto de

ambas as frações de agregados reciclados, em teores moderados. No entanto, outros estudos são necessários para a confirmação desta hipótese.

Figura 60 – Teste de Tukey para resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.



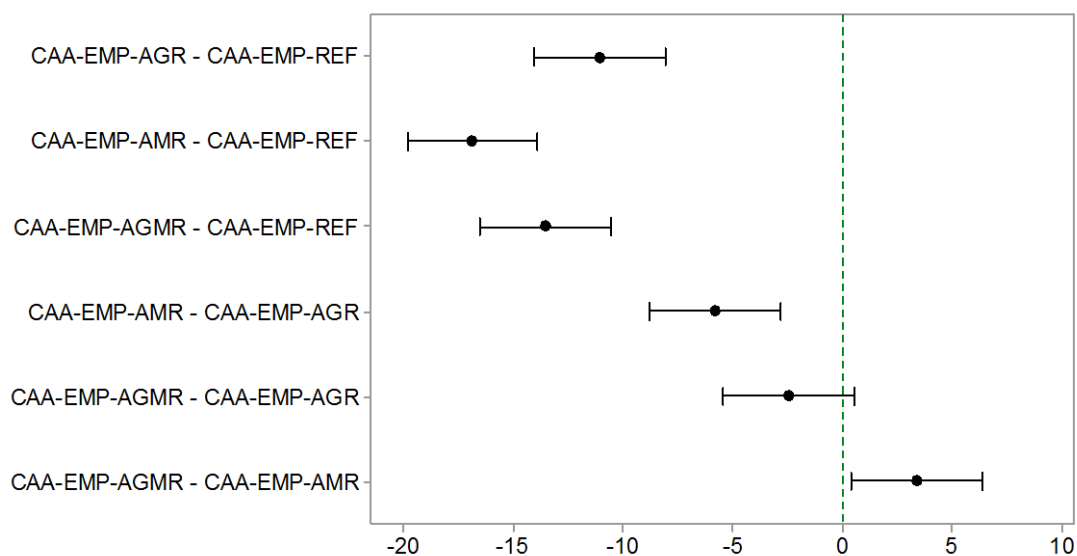
Na Tabela 48 é apresentada a análise de variância para a resistência à compressão dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

Tabela 48 – ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Médias quadradas	F	Valor p
Entre grupos	3	966,74	322,247	94,83	0,000
Dentro dos grupos	20	67,97	3,398		
Total	23	1034,71			

Por meio da análise dos dados constantes na Tabela 48 é possível notar que o valor p é menor do que o nível de significância especificado ($\alpha = 0,05$). Sendo assim, o teste de Tukey foi aplicado, e os resultados obtidos são apresentados na Figura 61.

Figura 61 – Teste de Tukey para resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dosados base no conceito de empacotamento de partículas.



Mediante análise dos dados expostos na Figura 61 é possível verificar que apenas as misturas CAA-EMP-AGR e CAA-EMP-AGMR podem ser consideradas estatisticamente iguais. Em comparação ao concreto de referência, todas as composições com agregados reciclados apresentaram resistência à compressão aos 28 dias estatisticamente inferior, com nível de confiança de 95%. Este fato já era esperado, uma vez que foi constatada grande redução na resistência à compressão das misturas que empregaram agregados reciclados e dosadas com base no conceito de empacotamento de partículas. Tais resultados podem indicar que os sistemas empacotados são mais sensíveis às variações de propriedades dos agregados, do que aqueles dosados por outros métodos, uma vez que o modelo de empacotamento utilizado considera apenas a distribuição de tamanho das partículas, sem fazer considerações quanto à sua forma e textura. Neste estudo, este fato foi evidenciado, contudo, é preciso maior investigação para a confirmação desta hipótese. Ainda há de se ressaltar que, nos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas a relação água/cimento foi maior do que naqueles dosados pelo método de Repette-Melo, sendo este fator também influente nas propriedades mecânicas.

A ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias para os concretos dosados pelo método de Repette-Melo é apresentada na Tabela 49.

Tabela 49 – ANOVA para a resistência à tração aos 28 dias dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Médias quadradas	F	Valor p
Entre grupos	3	1,455	0,4850	2,36	0,102
Dentro dos grupos	20	4,116	0,2058		
Total	23	5,571			

Por meio da análise dos dados constantes na Tabela 49 percebe-se que o valor p é maior do que o nível de significância especificado. Deste modo, é possível dizer, com nível de confiança de 95%, que não foram observadas diferenças significativas na resistência à tração dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo. Este fato sugere que a incorporação dos agregados reciclados tem menor influência na resistência à tração do que na resistência à compressão. O teste de Tukey não foi executado, uma vez que a análise de variância demonstrou não haver diferença significativa na resistência à tração dos concretos, aos 28 dias.

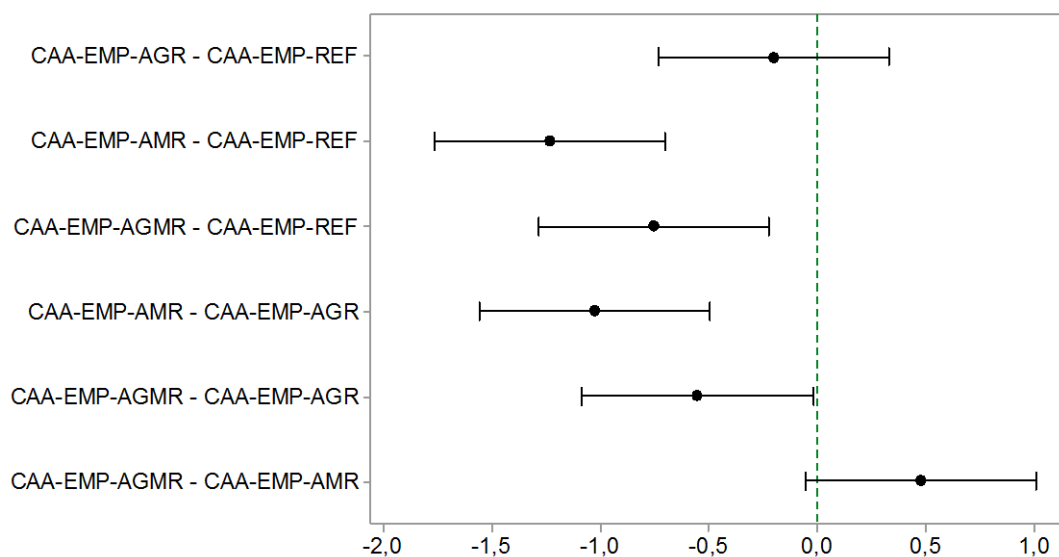
Na Tabela 50 é apresentada a ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com aplicação do conceito de empacotamento de partículas.

Tabela 50 – ANOVA para a resistência à tração aos 28 dias dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Médias quadradas	F	Valor p
Entre grupos	3	5,612	1,8706	17,23	0,000
Dentro dos grupos	20	2,171	0,1086		
Total	23	7,783			

É possível notar, mediante análise dos dados constantes na Tabela 50, que o valor p é menor do que o nível de significância especificado ($\alpha = 0,05$). Desta maneira, o teste de Tukey foi aplicado, e os resultados obtidos são apresentados na Figura 62.

Figura 62 – Teste de Tukey para a resistência à tração aos 28 dias ds concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.



Ao analisar os dados apresentados na Figura 62 nota-se que somente a resistência à tração do concreto CAA-EMP-AGR pode ser considerada estatisticamente igual à do traço de referência. As demais misturas apresentaram diferenças significativas, com nível de confiança de 95%. De certo modo, os resultados de resistência à tração vão ao encontro com o observado para a resistência à compressão. Mais uma vez fica evidenciada a maior influência negativa exercida pela incorporação dos agregados reciclados nas misturas dosadas com base no conceito de empacotamento de partículas do que naquelas pelo método de Repette-Melo.

A análise de variância também foi executada para o módulo de elasticidade. Os resultados apresentados na Tabela 51 são relativos aos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

Tabela 51 – ANOVA para o módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Médias quadradas	F	Valor p
Entre grupos	3	27,09	9,030	2,39	0,099
Dentro dos grupos	20	75,58	3,779		
Total	23	102,67			

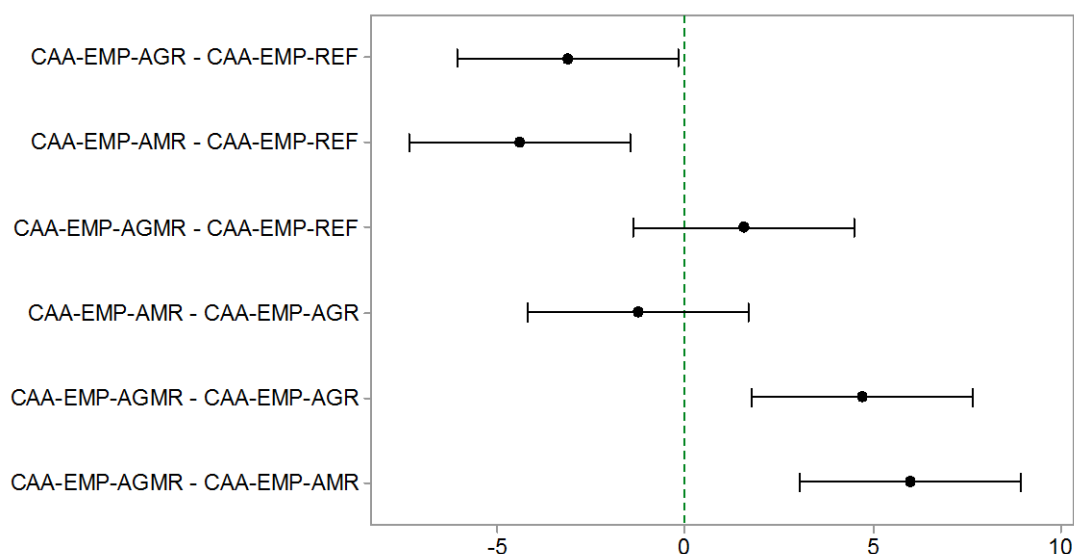
Pela análise dos dados expostos na Tabela 51 é possível verificar que não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas no módulo de elasticidade dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo. Tal fato reforça que, para composições com menor relação água/cimento, a influência negativa da incorporação de agregados reciclados nas propriedades mecânicas é minimizada. Na Tabela 52 é apresentada a ANOVA para o módulo de elasticidade dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

Tabela 52 – ANOVA para o módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Médias quadradas	F	Valor p
Entre grupos	3	137,15	45,716	13,78	0,000
Dentro dos grupos	20	66,37	3,318		
Total	23	203,52			

Mediante análise dos dados constantes na Tabela 52 é possível concluir que foram verificadas diferenças significativas entre os módulos de elasticidade dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas. Deste modo, o teste de Tukey foi aplicado e os resultados obtidos são apresentados na Figura 63.

Figura 63 – Teste de Tukey para o módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.



Ao analisar os dados constantes na Figura 63 verifica-se que apenas o módulo de elasticidade do concreto CAA-EMP-AGMR pode ser considerado estatisticamente similar ao traço de referência. No entanto, o comportamento exibido pela composição CAA-EMP-AGMR é considerado anômalo, uma vez que esta mistura não apresentou resistência à compressão compatível com o módulo de elasticidade obtido. As demais misturas com agregados reciclados apresentaram redução estatisticamente significativa do módulo de elasticidade em comparação ao concreto de referência. Tal fato reforça os comentários feitos anteriormente para as composições dosadas com base no conceito de empacotamento de partículas e que empregaram agregados reciclados.

Com relação à influência da granulometria do agregado reciclado empregado, é possível verificar que as composições produzidas com substituição da areia natural por agregado miúdo reciclado (CAA-AMR e CAA-EMP-AMR) apresentaram propriedades mecânicas inferiores às aquelas em que foi efetuada a substituição da fração graúda (CAA-AGR e CAA-EMP-AGR). Estes resultados podem estar relacionados com o fato de que o CAA demanda maior teor de agregados miúdos em sua composição, fazendo com que a substituição destes por agregados reciclados cause maior impacto nas propriedades mecânicas avaliadas. No entanto, cabe ressaltar que apenas foram verificadas diferenças estatisticamente significativas entre os concretos CAA-EMP-AGR e CAA-EMP-AMR no que concerne as resistências à compressão e à tração. Nos demais casos, as diferenças nas propriedades mecânicas analisadas não se mostraram estatisticamente significativas.

Por fim, há de se destacar que, apesar da redução nos valores médios das propriedades mecânicas dos concretos produzidos com agregados reciclados pelo método de Repette-Melo, todas as misturas apresentaram resistência à compressão média superior a 40 MPa e resistência à tração e módulo de elasticidade estatisticamente iguais aos do concreto de referência, aos 28 dias de idade. Ressalta-se ainda que a substituição de até 20% dos agregados miúdos ou graúdos naturais pelas respectivas frações de agregados reciclados, nos concretos dosados pelo método de Repette-Melo, não resultou em redução estatisticamente significativa das propriedades mecânicas avaliadas, com nível de confiança de 95%. Por outro lado, nos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas, foi verificada maior influência dos agregados reciclados nas propriedades

mecânicas, sendo observada redução expressiva destas. Salvo algumas exceções, todos os concretos produzidos com agregados reciclados e dosados com base no conceito de empacotamento de partículas apresentaram propriedades estatisticamente inferiores às do concreto de referência. Tal fato pode estar relacionado tanto com as características intrínsecas dos agregados reciclados quanto com a maior relação água/cimento utilizada nestes concretos.

7.5 Acabamento superficial

7.5.1 Argamassas

Os resultados obtidos da análise do acabamento superficial das placas de argamassa são sintetizados na Tabela 53. Neste estudo, foram moldadas placas das argamassas com os teores ótimos de aditivo superplastificante determinados (vide item 7.3.2). As imagens utilizadas neste estudo, sem e com processamento, são apresentadas no Apêndice A.

Tabela 53 – Áreas de poros superficiais das argamassas.

Argamassa	Tempo (min)	Área de poros (mm ²)	Área de poros (%)	Diâmetro máximo do poro (mm)
ARG-REF	5	122,60	0,22	2,644
	30	283,11	0,51	6,368
	60	1062,56	1,93	4,877
ARG-AMR	5	43,81	0,08	3,131
	30	109,52	0,20	4,701
	60	656,14	1,19	7,485
ARG-EMP-REF	5	378,68	0,69	5,027
	30	687,80	1,25	6,167
	60	1500,57	2,72	13,533
ARG-EMP-AMR	5	170,72	0,31	2,895
	30	321,51	0,58	9,891
	60	970,96	1,76	9,634

De maneira geral, é possível observar que houve aumento na área afetada por poros ao longo do tempo, em todas as argamassas estudadas. O diâmetro máximo dos poros, em alguns casos, também seguiu esta tendência. As argamassas também tiveram seu acabamento superficial classificado conforme a

escala proposta pelo CIB (CIB, 1973), utilizando como parâmetro classificatório a área afetada por defeitos superficiais determinada por Silva e Stemberk (2013) (vide item 6.2.2.3.3). Os resultados obtidos para as argamassas estudadas são apresentados na Tabela 54.

Tabela 54 – Classificação do acabamento superficial das argamassas segundo a metodologia CIB.

Argamassa	Tempo (min)	Área de poros (%)	Classe CIB*
ARG-REF	5	0,22	3
	30	0,51	4
	60	1,93	5
ARG-AMR	5	0,08	2
	30	0,20	3
	60	1,19	5
ARG-EMP-REF	5	0,69	4
	30	1,25	5
	60	2,72	6
ARG-EMP-AMR	5	0,31	3
	30	0,58	4
	60	1,76	5

* conforme adaptação de Silva e Stemberk (2013)

Ao analisar os resultados obtidos apresentados na Tabela 54, é possível verificar que as argamassas foram classificadas em diferentes classes, consoante o tempo decorrido após a adição do aditivo superplastificante: aos 5 minutos, os defeitos superficiais observados enquadraram as argamassas produzidas nas categorias 2, 3 e 4; aos 30 minutos, as classificações obtidas variaram entre as categorias 3, 4 e 5; por fim, aos 60 minutos, as argamassas foram enquadradas nas classes 5 e 6 de acabamento superficial. A classificação proposta pelo CIB (CIB, 1973) e adaptada por Silva e Stemberk (2013), no entanto, pode não refletir corretamente o acabamento superficial das argamassas, uma vez que foram observadas grandes diferenças entre as áreas afetadas por poros, que, no entanto, enquadraram as argamassas na mesma categoria de acabamento. Deste modo, a avaliação do acabamento superficial por análise digital de imagens parece ser um método mais preciso para a determinação e classificação do acabamento superficial de materiais cimentícios.

7.5.2 Concretos

Os resultados obtidos na análise do acabamento superficial das placas de concreto são sintetizados nas Tabelas 55 e 56. As imagens analisadas podem ser consultadas no Apêndice A.

Tabela 55 – Áreas de poros superficiais dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

Concreto	Tempo (min)	Área de poros (mm ²)	Área de poros (%)	Diâmetro máximo do poro (mm)
CAA-REF	5	4143,43	3,76	36,215
	30	5318,78	4,83	33,483
	60	10370,37	9,41	58,304
CAA-AGR	5	2514,05	2,28	36,792
	30	4603,19	4,18	44,952
	60	10389,75	9,43	54,206
CAA-AMR	5	3187,26	2,89	33,646
	30	5110,66	4,64	40,663
	60	12549,78	11,39	41,917
CAA-AGMR	5	3438,53	3,12	46,625
	30	11360,37	10,31	36,275
	60	21838,95	19,82	108,170

Tabela 56 – Áreas de poros superficiais dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

Concreto	Tempo (min)	Área de poros (mm ²)	Área de poros (%)	Diâmetro máximo do poro (mm)
CAA-EMP-REF	5	2741,81	2,49	27,208
	30	10624,79	9,64	72,503
	60	17782,80	16,14	83,872
CAA-EMP-AGR	5	4382,37	3,98	27,221
	30	11630,55	10,55	74,854
	60	27731,35	25,17	120,226
CAA-EMP-AMR	5	3472,66	3,15	25,163
	30	7146,82	6,49	43,404
	60	9358,15	8,49	36,119
CAA-EMP-AGMR	5	5480,67	4,97	17,758
	30	8763,82	7,95	30,727
	60	15825,33	14,36	59,586

Ao analisar os dados expostos nas Tabelas 55 e 56 é possível notar que a área de poros aumentou ao longo do tempo para todos os concretos estudados. O

diâmetro máximo dos poros também apresentou tendência de crescimento conforme o avanço do tempo.

A avaliação da qualidade do acabamento superficial das placas de concreto também foi analisada de acordo com a escala proposta pelo CIB (CIB, 1973), utilizando como parâmetro classificatório a área afetada por defeitos superficiais determinada por Silva e Stemberk (2013) (vide item 6.2.2.3.3). Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 57 e 58.

Tabela 57 – Classificação do acabamento superficial dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo segundo a metodologia CIB.

Concretos	Tempo (min)	Área de poros (%)	Classe CIB*
	5	3,76	7
CAA-REF	30	4,83	7
	60	9,41	7
	5	2,28	6
CAA-AGR	30	4,18	7
	60	9,43	7
	5	2,89	7
CAA-AMR	30	4,64	7
	60	11,39	7
	5	3,12	7
CAA-AGMR	30	10,31	7
	60	19,82	7

* conforme adaptação de Silva e Stemberk (2013)

Tabela 58 – Classificação do acabamento superficial dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas segundo a metodologia CIB.

Concretos	Tempo (min)	Área de poros (%)	Classe CIB*
	5	2,49	6
CAA-EMP-REF	30	9,64	7
	60	16,14	7
	5	3,98	7
CAA-EMP-AGR	30	10,55	7
	60	25,17	7
	5	3,15	7
CAA-EMP-AMR	30	6,49	7
	60	8,49	7
	5	4,97	7
CAA-EMP-AGMR	30	7,95	7
	60	14,36	7

* conforme adaptação de Silva e Stemberk (2013)

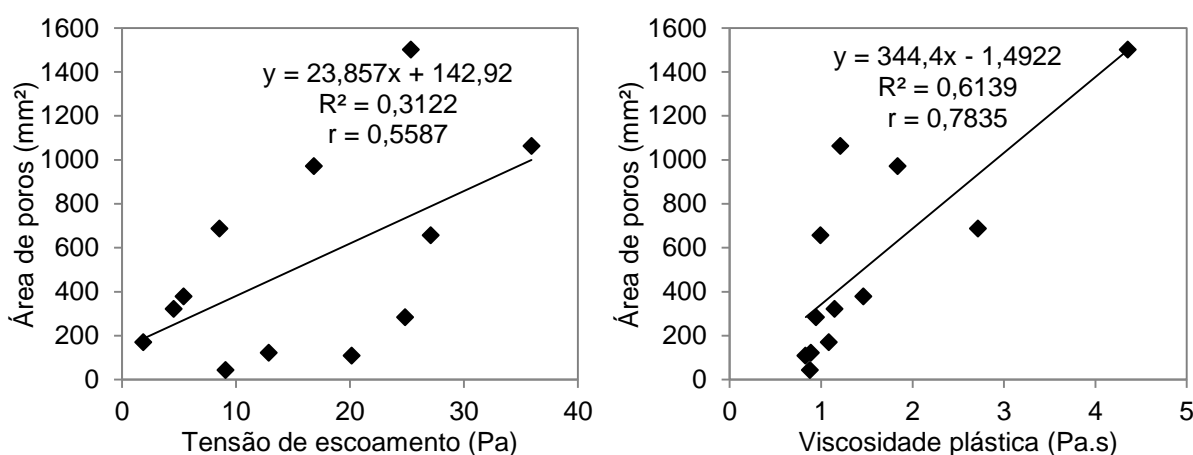
Mediante análise dos dados constantes nas Tabelas 57 e 58, é possível verificar que, em praticamente todos os casos, o acabamento superficial dos concretos se enquadrava na mesma classificação segundo a escala proposta pelo CIB (CIB, 1973) e adaptada por Silva e Stemberk (2013). Este fato reforça os comentários feitos anteriormente para o acabamento superficial das argamassas, ou seja, tal escala pode não refletir corretamente o acabamento superficial dos materiais cimentícios, uma vez que foram observadas grandes diferenças entre as áreas afetadas por poros, no entanto, os concretos foram enquadrados na mesma categoria de acabamento superficial.

7.5.3 Correlações entre a qualidade do acabamento superficial e as propriedades reológicas

7.5.3.1 Argamassas

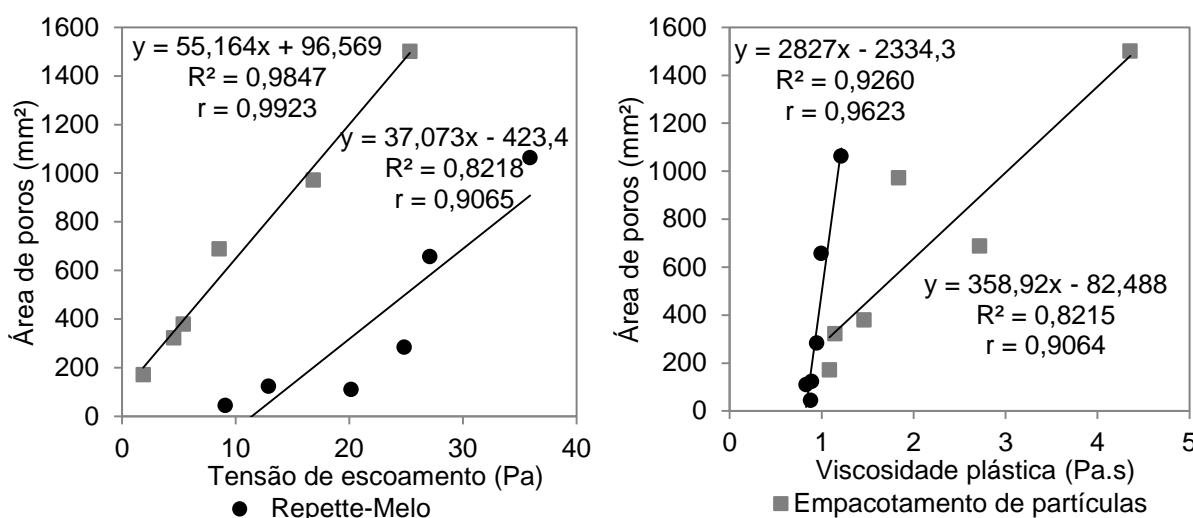
Um dos objetivos da análise do acabamento superficial das placas de argamassa e concreto era verificar a possível existência de correlação entre a qualidade do acabamento (medida em termos de área afetada por poros) e as propriedades reológicas destes compósitos cimentícios. Nesse sentido, são apresentados na Figura 64 as correlações obtidas para o acabamento superficial das argamassas e os seus respectivos parâmetros reológicos.

Figura 64 – Correlação entre os parâmetros reológicos e o acabamento superficial das argamassas.



Ao analisar os dados constantes na Figura 64, nota-se que não foram observadas boas correlações lineares entre o acabamento superficial de todas as argamassas e as respectivas tensões de escoamento e viscosidades plásticas. Entretanto, salienta-se que as argamassas estudadas apresentaram comportamentos reológicos distintos: àquelas dosadas pelo método de Repette-Melo exibiram maior tensão de escoamento e menor viscosidade, em comparação com às dosadas pelo conceito de empacotamento de partículas, que apresentaram comportamento inverso. Deste modo, foi feita uma análise em separado para as argamassas dosadas pelos diferentes métodos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 65.

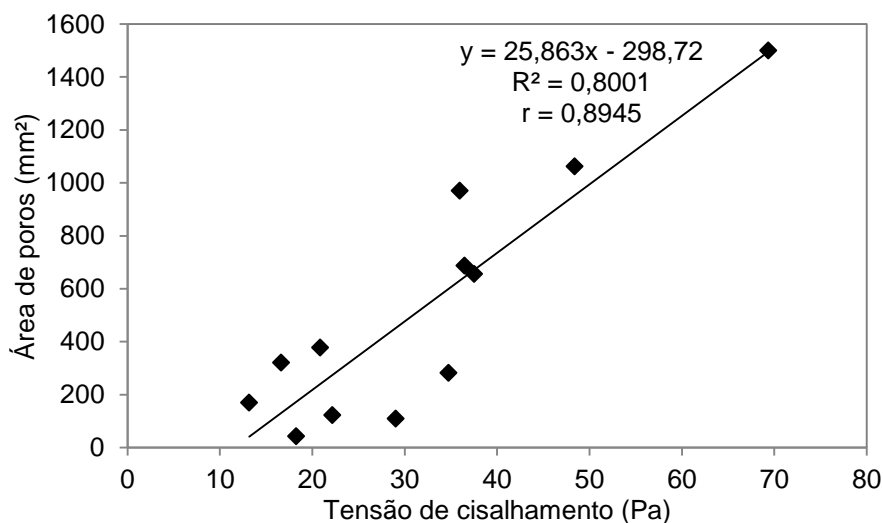
Figura 65 – Correlação entre os parâmetros reológicos e o acabamento superficial das argamassas, de acordo com o método de dosagem.



Mediante análise dos dados expostos na Figura 65 é possível perceber que o acabamento superficial de ambas as argamassas se correlacionou fortemente com ambos os parâmetros reológicos. Deste modo, não foi possível estabelecer uma relação clara sobre qual parâmetro reológico tem mais influência sobre o acabamento superficial das argamassas. A afirmação que pode ser feita em vista dos resultados obtidos é: menores tensões de escoamento e viscosidades produzirão melhor acabamento superficial. Entretanto, a definição de quão pequenas devem ser estas tensões e viscosidades não pode ser diretamente estabelecida, uma vez que o acabamento superficial parece ser influenciado por ambos os parâmetros reológicos. Deste modo, foi feita uma tentativa de correlação entre a

qualidade do acabamento superficial e a tensão de cisalhamento destas argamassas, quando a taxa de cisalhamento é igual a 10 s^{-1} . De acordo com Roussel (2006), a taxa de cisalhamento típica obtida no lançamento de materiais cimentícios é, de no máximo, 10 s^{-1} . Os resultados obtidos são apresentados na Figura 66.

Figura 66 – Correlação entre a tensão de cisalhamento e o acabamento superficial das argamassas.



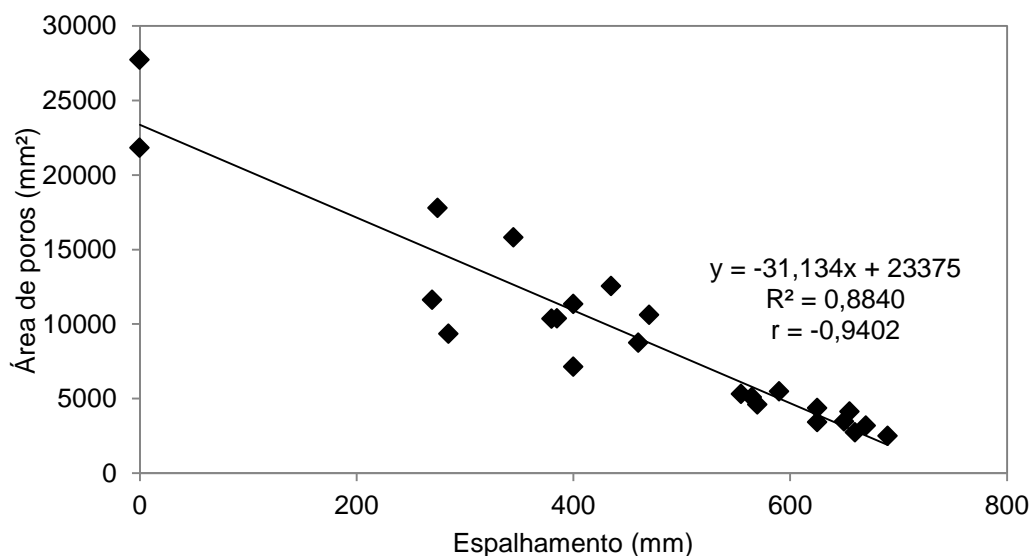
Ao analisar a Figura 66, nota-se que foi obtida uma boa correlação linear ($r = 0,8945$) entre a tensão de cisalhamento, a 10 s^{-1} , e a qualidade do acabamento superficial das placas de argamassa, sendo que o modelo explica 80,01% da variação na área de poros. Os resultados obtidos ainda indicaram que, com tensões de cisalhamento inferiores a 35 Pa, foi possível obter placas de argamassa com área afetada por poros superficiais inferior a 1,00%. Deste modo, é possível inferir que o acabamento superficial está relacionado tanto à tensão de escoamento quanto à viscosidade plástica das argamassas, sendo a tensão de cisalhamento um bom parâmetro para prever a qualidade deste acabamento.

7.5.3.2 Concretos

No caso dos concretos, não foi possível determinar os parâmetros reológicos fundamentais, uma vez que não se dispunha de reômetro para tal finalidade. Deste modo, tentou-se correlacionar as propriedades dos concretos no estado fresco com a qualidade do acabamento superficial, medida em termos de

área de poros superficiais. Inicialmente, correlacionaram-se os diâmetros médios de espalhamento e as áreas de poros apresentadas pelos concretos. Os resultados obtidos são exibidos na Figura 67.

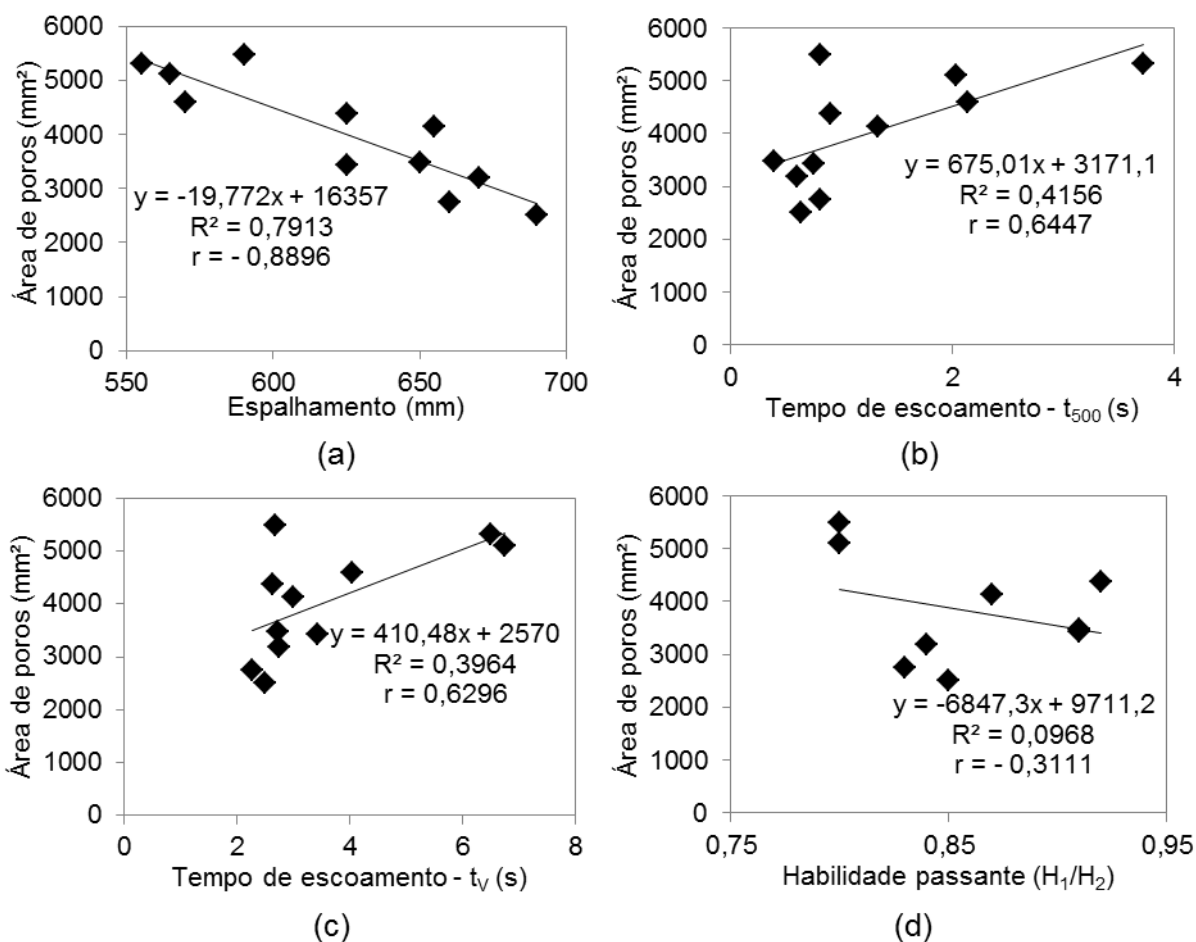
Figura 67 – Correlação entre o diâmetro de espalhamento e a área de poros dos concretos.



Ao analisar os dados apresentados na Figura 67, é possível notar forte correlação linear ($r = -0,9402$) entre o espalhamento e a área de poros dos concretos. No entanto, é importante fazer uma ressalva: espalhamentos inferiores à 550 mm não são característicos de concretos autoadensáveis. Por isso, foi executada uma análise em separado da correlação entre o espalhamento das misturas autoadensáveis e o acabamento, assim como das demais propriedades no estado fresco, ou seja, tempos de escoamento t_{500} e no funil V e habilidade passante. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 68.

Por meio da análise dos dados constantes na Figura 68 é possível constatar que foi verificada boa correlação linear ($r = -0,8896$) entre o diâmetro de espalhamento e a área de poros dos concretos, de modo que, a medida que o espalhamento aumenta, a área de poros superficiais decresce. No entanto, não foi observada boa correlação entre os tempos de escoamento (t_{500} e no funil V) e a qualidade do acabamento superficial dos concretos estudados. Com relação à habilidade passante, não foi possível estabelecer qualquer relação entre esta e a área de poros dos concretos.

Figura 68 – Correlação das propriedades no estado fresco e a área de poros dos concretos: (a) espalhamento; (b) tempo de escoamento t_{500} ; (c) tempo de escoamento no funil V e (d) habilidade passante.



Deste modo, é possível vislumbrar que o acabamento superficial dos concretos pode ser mais influenciado pelo diâmetro de espalhamento do que por outras propriedades no estado fresco, contudo, é preciso levar em consideração que os concretos estudados se enquadraram nas mesmas classes de viscosidade plástica (tempo de escoamento t_{500} e no funil V), sendo, portanto, necessária maior investigação para a confirmação dessa hipótese.

7.6 Análise de custos

A análise de custos dos concretos produzidos tomou como base somente os preços dos materiais constituintes das misturas. Os custos dos materiais foram extraídos do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

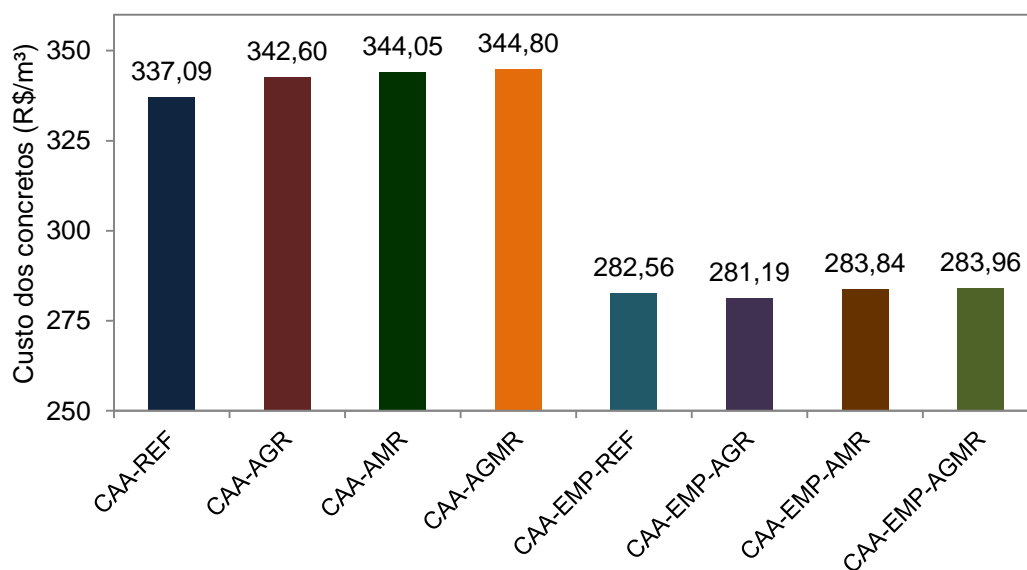
– SINAPI (IBGE, 2016), tendo como base o mês de outubro de 2016, com preços praticados no estado de São Paulo. Somente o custo unitário da água foi calculado com base no tarifário da Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S.A – SANASA Campinas (SANASA, 2015). Na Tabela 59 estão sintetizados os custos dos materiais. Cabe salientar que estão incluídos apenas os custos dos insumos nos valores reportados, estando excluídos os custos com transporte dos materiais.

Tabela 59 – Custo das matérias-primas.

Matéria-prima	Custo (R\$)	Unidade de medida
Cimento CP II	21,45	Saco (50 kg)
Sílica ativa	2,44	kg
Pó de quartzo	0,40	kg
Areia média	62,75	m ³
Pedrisco	61,64	m ³
Brita 1	48,28	m ³
Agregado reciclado	25,25	m ³
Aditivo superplastificante	1865,59	Tambor (200 kg)
Água	5,40	m ³

Tendo como base os preços apresentados na Tabela 59, os custos dos concretos foram calculados e encontram-se ilustrados na Figura 69.

Figura 69 – Custo dos concretos, em reais/m³.

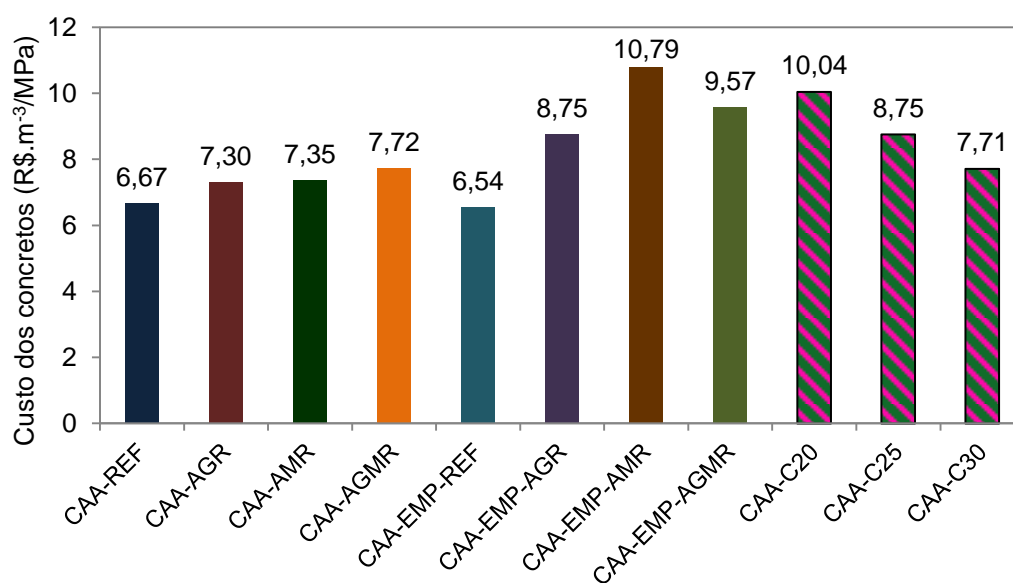


Ao analisar a Figura 69, é possível notar que não houve grande variação de preços entre os concretos de referência e os respectivos concretos com

agregados reciclados. De modo geral, o custo mais baixo dos agregados reciclados não foi suficiente para suplantar o aumento de custo ocasionado pelo maior teor de aditivo superplastificante empregado nos concretos com agregados reciclados, fazendo com que estas misturas se apresentassem ligeiramente mais caras. Cabe salientar também que os concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas apresentaram menor custo total, em virtude do menor consumo de cimento e de aditivo superplastificante.

Outro fator importante no que tange ao custo dos concretos é analisar o desempenho das misturas com relação a eficiência do traço, ou seja, o custo do concreto por MPa de resistência à compressão obtido aos 28 dias. Nesse sentido, os resultados deste estudo são apresentados na Figura 70. A título de comparação, também é exibido este parâmetro para composições de CAA das classes de resistência C20, C25 e C30, apresentadas no SINAPI (IBGE, 2016).

Figura 70 – Custo dos concretos, em reais.m³/MPa.



Ao analisar os dados constantes na Figura 70, é possível notar que o CAA-EMP-REF apresentou o menor custo por MPa de resistência à compressão, fato este relacionado ao bom desempenho mecânico obtido por este concreto aliado ao menor custo total da composição. A eficiência do traço CAA-REF foi bastante parecida com a do CAA-EMP-REF, em virtude deste concreto ter apresentado a maior resistência à compressão aos 28 dias. As misturas CAA-AGR, CAA-AMR, CAA-AGMR apresentaram valores muito similares de eficiência do traço, da mesma

ordem do custo do CAA-C30. Já os traços CAA-EMP-AGR, CAA-EMP-AMR e CAA-EMP-AGMR exibiram pior desempenho no que tange ao custo por MPa de resistência obtido, uma vez que estas misturas apresentaram resistências à compressão inferiores aos demais traços. Cabe destacar que a eficiência do traço dos concretos CAA-EMP-AGR e CAA-EMP-AGMR foi bastante similar a dos concretos CAA-C25 e CAA-C20, respectivamente, indicando a viabilidade econômica de aplicação destes concretos.

Portanto, verificou-se neste estudo que o custo relativo de concretos de maior resistência à compressão é inferior ao daqueles de menor resistência, em virtude de não ser observada diferença de preços expressiva nos concretos produzidos. Deste modo, salienta-se que a análise de custos deve contemplar não somente os custos dos materiais em si, mas também incorporar um parâmetro de desempenho, que leve em consideração as propriedades mecânicas do material.

8 CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

- em geral, os agregados reciclados comprometeram a fluidez das argamassas e dos concretos estudados, mesmo com a execução de pré-molhagem, em virtude de possuírem maior teor de materiais pulverulentos aderidos às suas partículas, formato mais anguloso e textura rugosa, e também pela maior absorção de água, quando comparados aos agregados naturais;

- a perda de fluidez ocasionada pelos agregados reciclados nas argamassas e concretos pode ser corrigida com o incremento no teor de aditivo superplastificante nas misturas;

- foi observada boa correlação linear entre o parâmetro reológico tensão de escoamento e o espalhamento das argamassas, no entanto, a relação entre a viscosidade plástica e o tempo de escoamento não foi tão evidente;

- a diminuição observada nas propriedades mecânicas e na massa específica dos concretos que empregaram agregados reciclados, em comparação aos traços de referência, é reflexo das propriedades intrínsecas destes agregados, ou seja, maior absorção de água, menor resistência mecânica e massa específica, em comparação aos agregados naturais;

- o aumento na absorção de água por imersão, no índice de vazios e na absorção capilar observado nos concretos produzidos com agregados reciclados também está relacionado com a maior capacidade de absorção de água destes agregados, em comparação com os agregados naturais, tornando a estrutura dos compósitos mais porosa, e, portanto, mais suscetível a ação de agentes externos;

- não foram observadas diferenças estatisticamente significativas na resistência à compressão, à tração e no módulo de elasticidade, aos 28 dias, dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo e produzidos com substituição de 20% do agregado miúdo ou graúdo natural pela respectiva fração de agregado reciclado;

- nos concretos produzidos com agregados reciclados e dosados com base no conceito de empacotamento de partículas, foram observadas diferenças

estatisticamente significativas em praticamente todas as propriedades mecânicas avaliadas;

- foi constatada boa correlação linear entre a área de poros superficiais das argamassas e a tensão de cisalhamento das mesmas, indicando que o controle das propriedades reológicas destes materiais cimentícios pode ser um bom meio de prever a qualidade do acabamento superficial;

- foi verificada boa correlação entre o diâmetro de espalhamento e a área afetada por poros superficiais dos concretos, no entanto, não foram constatadas boas correlações entre os demais parâmetros reológicos (tempos de escoamento t_{500} e t_v e habilidade passante) e a qualidade do acabamento superficial dos concretos estudados;

- não foram observadas grandes diferenças de custos entre os concretos produzidos com agregados reciclados e aos respectivos traços de referência, sendo que os concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas exibiram custos menores do que àqueles dosados pelo método de Repette-Melo;

- em termos de eficiência do traço, o concreto CAA-EMP-REF apresentou o melhor índice, seguido pelos concretos dosados pelo método de Repette-Melo, indicando, assim, maior viabilidade econômica de aplicação.

8.1 Sugestões de trabalhos futuros

Apesar de todo trabalho realizado, não é possível abranger todas as propriedades de interesse relacionadas aos assuntos tratados nesta dissertação. Deste modo, são sugeridos alguns tópicos para a continuidade do trabalho:

- analisar a influência de outros teores de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados nas propriedades do concreto autoadensável;

- verificar de que modo a composição dos agregados reciclados influencia nas propriedades dos materiais cimentícios;

- avaliar a durabilidade de concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados;

- avaliar o comportamento estrutural de concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados;

- avaliar a retração e a fluência dos concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados;
- analisar a resistência ao fogo de concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados;
- analisar de modo mais abrangente a influência da incorporação de agregados reciclados em concretos autoadensáveis dosados com base em modelos de empacotamento de partículas;
- verificar a influência da forma e da textura dos agregados reciclados nas propriedades reológicas de argamassas e concretos autoadensáveis;
- estudar argamassas com diferentes comportamentos reológicos e confirmar a correlação dos parâmetros reológicos com a qualidade do acabamento superficial;
- estudar o comportamento reológico dos concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados, por meio da reometria.

9 REFERÊNCIAS

AIM, R. B.; GOFF, P. Effet de paroi dans les empilements désordonnés de sphères et application à la porosité de mélanges binaires. **Powder Technology**, v. 1, n. 5, p. 281-290, 1968.

ALENCAR, R.; HELENE, P. Concreto auto-adensável de elevada resistência – inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados. **Revista Concreto e Construções**, n. 43, p. 43-52, 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **ACI 237R-07: Self-consolidating concrete**. Farmington Hills, 2007. 34p.

_____. **ACI 309.2R-15: Guide to Identification and Control of Visible Surface Effects of Consolidation on Formed Concrete Surfaces**. Farmington Hills, 2015. 10p.

ANDREU, G., MIREN, E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 227-235, 2014.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ASLANI, F.; NEJADI, S. Mechanical properties of conventional and self-compacting concrete: An analytical study. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 330-347, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama de Resíduos Sólidos 2015**. São Paulo, 2016. Disponível em: < http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 18 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001a. 5p.

_____. **NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001b. 3p.

_____. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2002. 8p.

_____. **NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2003a. 6p.

_____. **NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas.** Rio de Janeiro, 2001c. 3 p.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009a. 6p.

_____. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009b. 8p.

_____. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003b. 6p.

_____. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007. 9p.

_____. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016. 12p.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009c. 9p.

_____. **NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011a. 5p.

_____. **NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2008. 16p.

_____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005. 4p.

_____. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2012. 3p.

_____. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004a. 71p.

_____. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004b. 16p.

_____. **NBR 11578: Cimento Portland Composto – Especificação.** Rio de Janeiro, 1997. 5p.

_____. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2011b. 19p.

_____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2011b. 23p.

_____. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2004c. 12p.

_____. **NBR 15823-1: Concreto auto-adensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco.** Rio de Janeiro, 2010a. 11p.

_____. **NBR 15823-2: Concreto auto-adensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams.** Rio de Janeiro, 2010b. 8p.

_____. **NBR 15823-4: Concreto auto-adensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L.** Rio de Janeiro, 2010c. 8p.

_____. **NBR 15823-5: Concreto auto-adensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V.** Rio de Janeiro, 2010d. 7p.

_____. **NBR 15823-6: Concreto auto-adensável - Parte 6: Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação.** Rio de Janeiro, 2010e. 7p.

_____. **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2009d. 11p.

BANFILL, P. F. G. Feasibility study of a coaxial cylinders viscometer for mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 17, n. 2, p. 329-339, 1987.

BANFILL, P. F. G. Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. **Construction and Building Materials**, v. 8, n. 1, p. 43-50, 1994.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh mortar—a review. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis, p. 73-82, 2005.

BANFILL, P. F. G. Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2955-2960, 2011.

BARBOSA, M. P. *et al.* Determinação de parâmetros reológicos de argamassas e concreto através de técnicas alternativas. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 3, p. 440-480, 2011.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. Amsterdam: Elsevier, 1989.

BARTOS, P. **Fresh concrete: properties and tests**. Amsterdam: Elsevier, 1992.

BEHERA, M. *et al.* Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 501-516, 2014.

BENITO, F. J. *et al.* Acabado superficial de hormigones autocompactantes. Método ICS. In: IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável, 2015, Porto, **Anais ...**, Porto, p. 601-610, 2015

BISSONNETTE, B.; COURARD, L.; GARBACZ, A. **Concrete Surface Engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 25 mai. 2015.

CABRAL, A. E. B. Concrete with construction and demolition wastes (CDW). In: PACHECO-TORGAL, F. *et al.* (Ed.). **Eco-efficient concrete**. Amsterdam: Elsevier, 2013.

CABRAL, A. E. B. *et al.* Performance estimation for concretes made with recycled aggregates of construction and demolition waste of some Brazilian cities. **Materials Research**, v. 15, n. 6, p. 1037-1046, 2012.

CAMPOS, H. F., MARQUES FILHO, J., KLEIN, N. S. Concretos sustentáveis otimizados por Modelos de Empacotamento de Partículas: Revisão bibliográfica. In: 58º Congresso Brasileiro do Concreto, 2016, Belo Horizonte, **Anais...**, p. 1-16, 2016.

CARRO-LÓPEZ, D. *et al.* Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 491-501, 2015.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 303 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

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.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

CHATEAU, X. Particle packing and the rheology of concrete. In: ROUSSEL, N. (Ed.). **Understanding the rheology of concrete**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.

CHEN, J. J.; KWAN, A. K. H. Superfine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 1-10, 2012.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.

CHOI, M.; PARK, K.; OH, T. Viscoelastic Properties of Fresh Cement Paste to Study the Flow Behavior. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 3, p. 65-74, 2016.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). Diagnosis and Assessment of Concrete Structures – State of the Art Report. **Bulletin d' Information n. 192**, 1989.

CONCRETE INTERNATIONAL BOARD - CIB. **Tolerances on blemishes of concrete**. Nº 24 W 29, Rotterdam, 1973.

COURARD, L. *et al.* Influence of the reuse of OSB and marine plywood formworks on concrete surface aesthetics. **Materials and structures**, v. 45, n. 9, p. 1331-1343, 2012.

DACZKO, J. A. **Self-Consolidating Concrete: Applying What we Know**. New York: Spon Press, 2012.

DE BRITO, J.; SAIKIA, N. **Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste**. London: Springer Science & Business Media, 2012.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. London: E & FN Spon, 1999.

DE LARRARD, F.; FERRARIS, C. F.; SEDRAN, T. Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material. **Materials and Structures**, v. 31, n. 7, p. 494-498, 1998.

DESNERCK, P. *et al.* Mechanical Properties. In: KHAYAT, K. H.; DE SCHUTTER, G. (Eds.). **Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete**. London: Springer Science & Business Media, 2014.

DIERYCK, V. *et al.* Surface quality of self-compacting concrete and raw materials properties. In: Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 2005, Chicago, **Proceedings...**, Northwestern University, Evanston, p. 287–295. 2005

FAKITSAS, C. G. *et al.* Effects of recycled concrete aggregates on the compressive and shear strength of high-strength self-consolidating concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 4, p. 356-361, 2011.

FELEKOĞLU, B. *et al.* The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 9, p. 1719-1726, 2006.

FENNIS, S. A. A. M. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. 2011. 256 p. Tese (Doutorado) – Delft University of Technology, Delft, 2011.

FERRARIS, C. F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 104, n. 5, p. 461, 1999.

FERRARIS, C. F.; DE LARRARD, F.; MARTYS, N. S. Fresh concrete rheology: recent developments. **Materials Science of Concrete VI**, p. 215-241, 2001.

FERRARIS, C. F.; MARTYS, N.S. Concrete rheometers. In: ROUSSEL, N. (Ed.). **Understanding the rheology of concrete**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.

FERRARIS, C. F.; OBLA, K. H.; HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 245-255, 2001.

FEYS, D. *et al.* Extension of the Reiner–Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers. **Materials and Structures**, v. 46, n. 1-2, p. 289-311, 2013.

FUNK, J. E.; DINGER, D. **Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing**. New York: Springer Science & Business Media, 1994.

GESOGLU, M. *et al.* Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 334-344, 2015.

GIROTTI, L. S. **Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto auto-adensável**. 2012. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

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

GRACE CONSTRUCTION PRODUCTS. ADVA: **Aditivo superplastificante (SP II) para concreto**. Disponível em: <https://gcpat.com/construction/pt-br/Documents/ADVA_2015.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2015.

GRDIC, Z. J. *et al.* Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1129-1133, 2010.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 2009. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

GÜNEYISI, E. *et al.* Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 622-630, 2016.

HELENE. P. R. L. La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón. **Hormigón**. AATH. 10. Maio/agosto, 25-35, 1983.

HU, C.; DE LARRARD, F. The rheology of fresh high-performance concrete. **Cement and concrete research**, v. 26, n. 2, p. 283-294, 1996.

HU, J.; WANG, K. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1196-1204, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2015.

_____. **Preços dos Insumos – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI)**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/sinapi/defaulttabelas.shtml>. Acesso em: 20 nov 2016.

IRGENS, F. **Rheology and Non-Newtonian Fluids**. London: Springer International Publishing Switzerland, 2014.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil - contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 102 f. Tese (livre docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KAPOOR, K.; SINGH, S. P.; SINGH, B. Durability of self-compacting concrete made with recycled concrete aggregates and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 67-76, 2016.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto adensável**. 2008. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

KREIJGER, P. C. The skin of concrete: composition and properties. **Matériaux et Construction**, v. 17, n. 4, p. 275-283, 1984.

KWAN, A. K. H.; FUNG, W. W. S. Effects of CSF content on rheology and cohesiveness of mortar. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, n. 2, p. 99-110, 2011.

KWAN, A. K. H.; FUNG, W. W. S.; WONG, H. H. C. Water film thickness, flowability and rheology of cement-sand mortar. **Advances in Cement Research**, v. 22, n. 1, p. 3-14, 2010.

KWAN, A. K. H.; LI, L. G. Combined effects of water film thickness and paste film thickness on rheology of mortar. **Materials and structures**, v. 45, n. 9, p. 1359-1374, 2012.

KWASNY, J. *et al.* Influence of rheology on the quality of surface finish of cement-based mortars. **Construction and Building Materials**, v. 89, p. 102-109, 2015.

LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEMAIRE, G.; ESCADEILLAS, G.; RINGOT, E. Evaluating concrete surfaces using an image analysis process. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 8, p. 604-611, 2005.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 169-176, 2013.

LIMA, F. M. R. **A formação da mineração urbana no Brasil: reciclagem de RCD e produção de agregados**. 2013. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

LOPES, R. L. **Avaliação da interferência dos finos no desempenho de concretos com resíduos de construção e demolição**. 2005. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LOVATO, P. S. *et al.* Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 437-447, 2012.

LU, C.; YANG, H.; MEI, G. Relationship between slump flow and rheological properties of self-compacting concrete with silica fume and its permeability. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 157-162, 2015.

MALKIN, A. Y. **Rheology fundamentals**. Toronto: ChemTec Publishing, 1994.

MANZI, S.; MAZZOTTI, C.; BIGNOZZI, M. C. Preliminary Studies on the Effect of C&DW on the Long-Term Properties of Sustainable Self-Compacting Concrete. In: **CONCREEP 10**. p. 1554-1560.

MCGEARY, R. K. Mechanical packing of spherical particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 44, n. 10, p. 513-522, 1961.

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

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto adensável com adição de filer calcário**. 2005. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

MOREIRA, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOOR, M. A.; UOMOTO, T. Rheology of high flowing mortar and concrete. **Materials and Structures**, v. 37, n. 8, p. 513-521, 2004.

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades**. 2001. 198 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2001.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting high performance concrete. **Progress in Structural Engineering and Materials**. v. 1, n. 4, p. 378-383, 1998.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

OZKUL, T.; KUCUK, I. Design and optimization of an instrument for measuring bughole rating of concrete surfaces. **Journal of the Franklin Institute**, v. 348, n. 7, p. 1377-1392, 2011.

PAIVA, H. *et al.* Correlation between mortar and concrete behavior using rheological analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 4, p. 177-188, 2015.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. 2010. 281 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A. *et al.* Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 113-120, 2014.

PETROU, M. F. *et al.* A unique experimental method for monitoring aggregate settlement in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 809-816, 2000.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: estudo de caso**. 2008. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

REVATHI, P.; SELVI, R. S.; VELIN, S. S. Investigations on Fresh and Hardened Properties of Recycled Aggregate Self Compacting Concrete. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, v. 94, n. 3, p. 179-185, 2013.

RIVA, R. D. D. **Efeitos das propriedades físicas dos grãos da fração areia de solos arenosos e de agentes de cimentação no comportamento de sistemas empacotados**. 2010. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ROUSSEL, N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 10, p. 1797-1806, 2006.

ROUSSEL, N.; GRAM, A. Physical Phenomena Involved in Flows of Fresh Cementitious Materials. In: ROUSSEL, N.; GRAM, A (Eds.). **Simulation of Fresh Concrete Flow**. Springer Netherlands, 2014.

ROUSSEL, N., LE ROY, R. The Marsh cone: a test or a rheological apparatus?. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, pp. 823-830, 2005.

SAFIUDDIN, M. D.; SALAM, M. A.; JUMAAT, M. Z. Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 11, n. 4, p. 1023-1041, 2011.

SCHAEFER, C. O.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Estudo do comportamento de lixiviação de argamassas produzidas com agregados reciclados. **Exacta**, v. 5, n. 2, p. 243-252, 2007.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, C. F. Recycling of masonry rubble. In: HANSEN, T. C. (Ed.). **Recycling of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992.

SCHWARTZENTRUBER, L. D. A.; LE ROY, R.; CORDIN, J. Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC). **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1203-1213, 2006.

SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K.; LAUGESEN, P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. **Interface Science**, v. 12, n. 4, p. 411-421, 2004.

SEÑAS, L.; PRIANO, C.; MARFIL, S. Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 498-505, 2016.

SILVA, Y. F. *et al.* Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 639-644, 2016.

SILVA, W. R. L.; STEMBERK, P. Expert system applied for classifying self-compacting concrete surface finish. **Advances in Engineering Software**, v. 64, p. 47-61, 2013.

SOCIEDADE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E SANEAMENTO S/A – SANASA. **Resolução Tarifária 2016**. Campinas, 2016. Disponível em: <<http://www.sanasa.com.br/document/noticias/2159.PDF>>. Acesso em: 20 nov 2016.

STROEVEN, P.; STROEVEN, M. SPACE system for simulation of aggregated matter application to cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1299-1304, 1999.

TATTERSALL, G. H. Application of rheological measurements to practical control of concrete. In: BANFILL, P.F.G. (Ed). **Rheology of Fresh Cement and Concrete**. London: E & FN Spon, 1991.

THOMPSON, M. S. Blowholes in concrete surfaces. **Concrete (London)**, v. 3, n. 2, p. 64-66, 1969.

TOUFAR, W.; BORN, M.; KLOSE, E. Contribution of optimisation of components of different density in polydispersed particles systems. **Freiberger Booklet A**, v. 558, p. 29-44, 1976.

TOUTOU, Z.; ROUSSEL, N. Multi scale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale. **Materials and Structures**, v. 39, n. 2, p. 189-199, 2006.

TOWNSEND, T. *et al.* Heavy metals in recovered fines from construction and demolition debris recycling facilities in Florida. **Science of the Total Environment**, v. 332, n. 1, p. 1-11, 2004.

TURK, K. Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 326-334, 2012.

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

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

TUYAN, M.; MARDANI-AGHABAGLOU, A.; RAMYAR, K. Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. **Materials & Design**, v. 53, p. 983-991, 2014.

VAN DER SLOOT, H. A. Quick techniques for evaluating the leaching properties of waste materials: their relation to decisions on utilization and disposal. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 17, n. 5, p. 298-310, 1998.

VANCE, K.; SANT, G.; NEITHALATH, N. The rheology of cementitious suspensions: A closer look at experimental parameters and property determination using common rheological models. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 38-48, 2015.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia de

Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VITA, M. O. **Estudo da retração plástica e da fissuração do concreto auto adensável nas primeiras idades: avaliação da influência dos tipos de adições minerais.** 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

VOGT, C. **Ultrafine particles in concrete.** 2010. 155 f. Tese (Doutorado) – Royal Institute of Technology, Stockholm, 2010.

ZHAO, Z. *et al.* Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 179-186, 2015.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas, 1997. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

10 APÊNDICE A

10.1 Propriedades reológicas

10.1.1 Pastas de cimento

Tabela 60 – Propriedades reológicas da pasta de cimento dosada pelo método de Repette-Melo.

Tempo (min)	Viscosidade (Pa.s)	Coefficiente R²
5	0,0559	0,9548
5	0,0574	0,9702
5	0,0596	0,9509
5	0,0480	0,9237
15	0,0527	0,9746
15	0,0591	0,9842
15	0,0617	0,9885
15	0,0540	0,9694
30	0,0627	0,9921
30	0,0590	0,9869
30	0,0791	0,9940
30	0,0613	0,9887

Tabela 61 – Propriedades reológicas da pasta de cimento dosada com base no conceito de empacotamento de partículas.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Coefficiente R²
5	-0,0435	0,0884	0,9998
5	0,8322	0,1099	0,9999
5	0,9570	0,0975	0,9981
15	1,0826	0,1090	0,9987
15	1,2097	0,1191	0,9987
15	2,6086	0,1059	0,9929
30	1,9358	0,1058	0,9949
30	1,7148	0,1266	0,9981
30	2,9155	0,1076	0,9909

10.1.2 Argamassas

- Modelo de Bingham modificado

Tabela 62 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-REF.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5	15,173	0,9947	0,0037	0,9989	269	1,89
5	13,217	0,8372	0,0040	0,9993	296	1,53
5	10,237	0,8419	0,0037	0,9992	305	1,98
30	27,559	1,1546	0,0034	0,9963	226	2,25
30	25,952	0,8058	0,0052	0,9959	244	1,68
30	21,032	0,8807	0,0043	0,9981	253	2,13
60	38,360	1,3546	0,0024	0,9915	189	2,76
60	35,246	1,2648	0,0039	0,9925	206	2,31
60	34,163	1,0201	0,0040	0,9928	208	2,25

Tabela 63 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-AMR, com 0,40% de aditivo.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5	26,872	0,9943	0,0035	0,9966	247	2,43
5	27,560	1,0219	0,0031	0,9962	245	2,31
5	23,767	0,9613	0,0035	0,9965	254	2,34
30	44,966	1,5395	0,0020	0,9857	199	2,64
30	40,679	1,3177	0,0026	0,9894	184	2,58
30	42,634	1,4254	0,0023	0,9879	206	2,64

Tabela 64 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-AMR, com 0,50% de aditivo.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5	10,080	0,8429	0,0038	0,9991	309	2,04
5	8,027	0,9200	0,0036	0,9989	325	2,10
5	9,129	0,8783	0,0037	0,9994	317	2,07
30	20,870	0,8543	0,0053	0,9973	264	2,28
30	19,391	0,8117	0,0056	0,9979	282	2,44
30	20,203	0,8287	0,0055	0,998	273	2,36
60	30,136	1,1160	0,0043	0,9948	194	2,88
60	24,247	0,8765	0,0052	0,9965	222	2,76
60	26,867	0,9972	0,0047	0,9961	208	2,82

Tabela 65 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-AMR, com 0,60% de aditivo.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5	4,281	0,8730	0,0039	0,9988	377	1,50
5	4,176	0,9323	0,0034	0,9992	376	1,98
5	4,255	0,8992	0,0037	0,9994	376	1,74
30	8,562	0,9436	0,0046	0,9992	320	2,28
30	8,352	1,0410	0,0042	0,9992	320	2,37
30	8,510	0,9890	0,0044	0,9996	320	2,33
60	20,751	0,7715	0,0069	0,9971	262	2,52
60	20,303	0,9087	0,0057	0,9975	260	2,61
60	20,554	0,8397	0,0063	0,9976	261	2,57

Tabela 66 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-REF, com 1,30% de aditivo.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5	5,745	1,6229	0,0061	0,9997	353	2,64
5	6,750	1,3151	0,0073	0,9994	365	2,58
5	6,179	1,4650	0,0068	0,9997	359	2,61
30	15,098	2,7200	0,0062	0,9985	281	3,48
30	13,567	2,5483	0,0100	0,9982	288	3,87
30	14,253	2,6419	0,0080	0,9985	284	3,68

Tabela 67 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-REF, com 1,40% de aditivo.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5	6,384	1,4298	0,0084	0,9993	372	2,52
5	4,416	1,4964	0,0076	0,9997	367	2,49
5	5,404	1,4632	0,0080	0,9995	369	2,51
30	9,308	2,6990	0,0083	0,9991	314	3,36
30	7,818	2,7387	0,0059	0,9993	327	3,15
30	8,559	2,7197	0,0070	0,9994	320	3,26
60	25,457	4,5335	0,0066	0,9926	210	4,05
60	25,234	4,1854	0,0025	0,9949	236	4,20
60	25,314	4,3484	0,0043	0,9945	223	4,13

Tabela 68 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-REF, com 1,50% de aditivo.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5	2,834	1,4675	0,0065	0,9997	382	2,19
5	1,197	1,1366	0,0050	0,9997	383	2,25
5	1,910	1,2827	0,0057	0,9998	382	2,22
30	7,487	2,2102	0,0075	0,9995	319	3,09
30	5,305	1,7740	0,0065	0,9996	369	2,94
30	6,264	1,9715	0,0070	0,9996	344	3,02
60	23,397	3,7750	0,0080	0,9943	232	3,90
60	17,079	2,1171	0,0108	0,9972	284	3,99
60	19,103	2,7813	0,0106	0,9966	258	3,95

Tabela 69 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-AMR, com 1,30% de aditivo.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5	1,610	1,0553	0,0046	0,9997	372	2,52
5	3,219	1,1132	0,0053	0,9997	377	2,66
5	2,422	1,0823	0,0049	0,9998	374	2,59
30	7,929	1,6264	0,0052	0,9994	298	3,21
30	11,366	1,9412	0,0066	0,9987	289	3,12
30	9,599	1,7645	0,0059	0,9995	294	3,17

Tabela 70 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-AMR, com 1,40% de aditivo.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5	1,389	1,0623	0,0043	0,9998	384	2,31
5	1,553	1,0614	0,0053	0,9997	379	2,46
5	2,662	1,1318	0,0039	0,9908	368	2,40
30	3,725	1,2347	0,0060	0,9995	375	3,48
30	5,325	1,0632	0,0062	0,9995	317	2,94
30	4,583	1,1440	0,0061	0,9997	324	3,09
60	14,846	2,2693	0,0073	0,9972	273	4,11
60	18,857	1,4452	0,0074	0,9951	217	4,26
60	16,833	1,7972	0,0076	0,9966	302	4,14

Tabela 71 – Propriedades reológicas da argamassa ARG-EMP-AMR, com 1,50% de aditivo.

Tempo (min)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	Constante c (Pa.s ²)	Coefficiente R ²	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5	1,702	1,0018	0,0040	0,9998	383	2,25
5	1,523	1,0357	0,0043	0,9999	398	2,28
5	1,839	1,0000	0,0042	0,9999	390	2,27
30	4,934	1,2316	0,0068	0,9993	378	2,61
30	5,643	1,1888	0,0066	0,9993	371	2,82
30	5,301	1,2089	0,0067	0,9994	374	2,72
60	7,664	1,8896	0,0081	0,9993	305	3,54
60	13,825	1,9102	0,0095	0,9977	266	3,84
60	10,770	1,8957	0,0088	0,9988	285	3,69

- Modelos de Bingham e de Herschel Bulkley

Tabela 72 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-REF – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Tempo (min)	Modelo de Bingham			Modelo de Herschel Bulkley			
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	R ²	Tensão de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s)	Índice de comportamento	R ²
5	-11,629	1,7970	0,9839	23,645	0,1950	1,4081	0,9986
5	-19,963	1,7426	0,9805	22,558	0,1205	1,4862	0,9988
5	-23,508	1,7091	0,9812	19,588	0,1261	1,4709	0,9990
30	10,117	1,8178	0,9860	44,669	0,1932	1,4164	0,9978
30	-2,691	1,8290	0,9741	42,514	0,0631	1,6285	0,9964
30	-6,723	1,7756	0,9792	32,712	0,1163	1,5033	0,9981
60	34,307	1,7525	0,9854	64,939	0,2110	1,3954	0,9972
60	24,010	1,9127	0,9807	56,281	0,1827	1,4464	0,9956
60	17,971	1,7625	0,9755	56,394	0,0945	1,5710	0,9957

Tabela 73 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-AMR com 0,40% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Tempo (min)	Modelo de Bingham			Modelo de Herschel Bulkley			
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	R ²	Tensão de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s)	Índice de comportamento	R ²
5	6,475	1,7156	0,9827	44,063	0,1302	1,4747	0,9982
5	8,993	1,6714	0,9844	44,558	0,1514	1,4399	0,9978
5	1,271	1,7077	0,9818	37,993	0,1392	1,4604	0,9971
30	38,791	1,8764	0,9833	74,948	0,2552	1,3710	0,9943
30	31,033	1,7777	0,9845	71,543	0,2175	1,3977	0,9950
30	34,739	1,8264	0,9843	68,139	0,1798	1,4244	0,9957

Tabela 74 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-AMR com 0,50% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Tempo (min)	Modelo de Bingham			Modelo de Herschel Bulkley			
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	R ²	Tensão de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s)	Índice de comportamento	R ²
5	-24,697	1,7402	0,9815	19,663	0,1239	1,4781	0,9986
5	-24,785	1,7598	0,9840	17,717	0,1569	1,4369	0,9983
5	-24,810	1,7505	0,9831	18,690	0,1404	1,4575	0,9985
30	-10,030	1,9037	0,9754	33,210	0,0940	1,5626	0,9971
30	-14,363	1,9165	0,9749	28,933	0,0957	1,5602	0,9971
30	-12,240	1,9105	0,9754	31,072	0,0948	1,5614	0,9971
60	11,303	1,8952	0,9821	48,227	0,1484	1,4792	0,9965
60	-3,726	1,8759	0,9763	36,613	0,1012	1,5471	0,9962
60	3,602	1,8869	0,9799	42,420	0,1248	1,5132	0,9963

Tabela 75 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-AMR com 0,60% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Tempo (min)	Modelo de Bingham			Modelo de Herschel Bulkley			
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	R ²	Tensão de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s)	Índice de comportamento	R ²
5	-28,672	1,7701	0,9820	16,910	0,1065	1,4190	0,9983
5	-25,277	1,7380	0,9849	15,237	0,1350	1,3794	0,9980
5	-27,030	1,7545	0,9838	16,073	0,1207	1,3992	0,9982
30	-26,749	1,9285	0,9823	18,837	0,1430	1,4784	0,9987
30	-22,936	1,9313	0,9851	17,996	0,1951	1,4218	0,9988
30	-24,902	1,9304	0,9840	18,417	0,1691	1,4501	0,9988
60	-15,131	2,0514	0,9699	30,163	0,0790	1,6182	0,9964
60	-10,466	1,9819	0,9768	29,565	0,1256	1,5198	0,9967
60	-12,819	2,0166	0,9737	29,864	0,1023	1,5690	0,9965

Tabela 76 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-REF com 1,30% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Tempo (min)	Modelo de Bingham			Modelo de Herschel Bulkley			
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	R ²	Tensão de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s)	Índice de comportamento	R ²
5	-19,808	2,5885	0,9906	15,289	0,4597	1,3346	0,9993
5	-27,056	2,5250	0,9852	16,930	1,4674	1,1663	0,9990
5	-23,529	2,5569	0,9881	17,388	0,2505	1,4456	0,9989
30	3,510	3,4068	0,9957	20,662	1,5425	1,1635	0,9980
30	-4,221	3,6148	0,9925	37,741	3,2105	1,1891	0,9437
30	-0,288	3,5085	0,9944	21,274	1,0765	1,2531	0,9973

Tabela 77 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-REF com 1,40% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Tempo (min)	Modelo de Bingham			Modelo de Herschel Bulkley			
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	R ²	Tensão de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s)	Índice de comportamento	R ²
5	-27,230	2,7194	0,9855	17,171	0,2847	1,4410	0,9987
5	-27,312	2,6826	0,9876	7,946	0,5194	1,3069	0,9996
5	-27,279	2,7010	0,9866	12,558	0,4021	1,3740	0,9992
30	-6,471	3,6014	0,9950	16,278	1,3090	1,2107	0,9985
30	-4,702	3,4152	0,9967	13,715	1,5394	1,1630	0,9990
30	-5,598	3,5064	0,9960	14,997	1,4242	1,1869	0,9988
60	20,997	4,9947	0,9920	26,694	4,0479	1,0466	0,9924
60	23,049	4,3828	0,9947	25,879	4,0673	1,0150	0,9952
60	21,956	4,6723	0,9942	26,287	4,0576	1,0308	0,9938

Tabela 78 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-REF com 1,50% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Tempo (min)	Modelo de Bingham			Modelo de Herschel Bulkley			
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	R ²	Tensão de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s)	Índice de comportamento	R ²
5	-28,059	2,5493	0,9886	13,197	0,3434	1,3851	0,9992
5	-34,411	2,1417	0,9866	12,191	0,2077	1,4325	0,9994
5	-31,534	2,3280	0,9876	12,694	0,2756	1,4088	0,9993
30	-12,098	3,1568	0,9935	15,798	0,8608	1,2621	0,9990
30	-18,961	2,7489	0,9914	14,644	0,5457	1,3167	0,9992
30	-15,794	2,9389	0,9925	15,221	0,7033	1,2894	0,9991
60	16,002	4,4219	0,9929	26,044	2,8807	1,0936	0,9937
60	-4,319	3,3436	0,9885	25,562	0,6975	1,3242	0,9960
60	4,144	3,8135	0,9918	25,803	1,7891	1,2089	0,9948

Tabela 79 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-AMR com 1,30% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Tempo (min)	Modelo de Bingham			Modelo de Herschel Bulkley			
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	R ²	Tensão de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s)	Índice de comportamento	R ²
5	-34,923	2,0373	0,9857	12,710	0,1786	1,4473	0,9994
5	-32,752	2,1579	0,9855	14,164	0,1931	1,4493	0,9992
5	-33,884	2,0960	0,9857	13,437	0,1858	1,4483	0,9993
30	-14,464	2,4698	0,9914	16,745	0,5098	1,3038	0,9991
30	-8,437	2,8436	0,9921	19,406	0,7126	1,2749	0,9980
30	-11,735	2,6445	0,9921	18,076	0,6112	1,2894	0,9986

Tabela 80 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-AMR com 1,40% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Tempo (min)	Modelo de Bingham			Modelo de Herschel Bulkley			
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	R ²	Tensão de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s)	Índice de comportamento	R ²
5	-38,257	2,0062	0,9867	9,770	0,1870	1,4332	0,9996
5	-37,109	2,1376	0,9848	12,688	0,1709	1,4681	0,9993
5	-36,260	1,9863	0,9796	7,903	0,2346	1,3890	0,9902
30	-30,766	2,3281	0,9863	14,574	0,2344	1,4338	0,9990
30	-33,188	2,2367	0,9827	17,435	0,6454	1,2827	0,9985
30	-32,036	2,2818	0,9846	16,286	0,1614	1,4939	0,9990
60	-1,612	3,1518	0,9921	21,904	0,9896	1,2357	0,9964
60	-6,371	2,5451	0,9836	40,320	0,9117	1,2812	0,9792
60	-4,422	2,8186	0,9883	28,818	0,3288	1,4017	0,9935

Tabela 81 – Parâmetros reológicos da argamassa ARG-EMP-AMR com 1,50% de aditivo – modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Tempo (min)	Modelo de Bingham			Modelo de Herschel Bulkley			
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	R ²	Tensão de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s)	Índice de comportamento	R ²
5	-35,539	1,9206	0,9865	7,413	0,1640	1,4458	0,9997
5	-39,187	1,9845	0,9863	9,588	0,1767	1,4406	0,9997
5	-40,495	1,9528	0,9855	8,501	0,1703	1,4432	0,9997
30	-30,890	2,4182	0,9850	15,906	0,2199	1,4568	0,9987
30	-30,361	2,3619	0,9846	16,726	0,2038	1,4653	0,9987
30	-30,640	2,3899	0,9848	16,316	0,2118	1,4611	0,9987
60	-16,952	2,9912	0,9907	17,048	0,5761	1,3287	0,9987
60	-9,773	3,0998	0,9882	23,013	0,5643	1,3456	0,9967
60	-13,477	3,0453	0,9897	20,031	0,5702	1,3372	0,9977

10.2 Propriedades mecânicas e índices físicos

10.2.1 Resistência à compressão axial

Tabela 82 – Resistência à compressão axial – CAA-REF.

CP	Idade			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1	21,82	34,37	41,85	46,84
2	22,13	32,10	41,59	52,59
3	20,90	34,67	34,72	54,91
4	22,52	31,17	41,59	48,79
5	22,38	31,75	39,46	47,31
6	22,45	30,41	36,33	52,83
Média	22,03	32,41	39,26	50,55
SD	0,61	1,73	3,06	3,34
COV	2,78%	5,35%	7,79%	6,61%
Mediana	22,26	31,93	40,53	50,69

Tabela 83 – Resistência à compressão axial – CAA-AGR.

CP	Idade			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1	22,31	29,95	34,10	47,46
2	20,95	33,16	32,33	43,38
3	22,47	28,93	40,65	45,02
4	22,91	32,55	36,71	48,06
5	20,78	29,83	36,47	50,98
6	19,06	29,37	35,14	46,58
Média	21,41	30,63	35,90	46,91
SD	1,44	1,77	2,83	2,62
COV	6,71%	5,78%	7,89%	5,59%
Mediana	21,63	29,89	35,81	47,02

Tabela 84 – Resistência à compressão axial – CAA-AMR.

CP	Idade			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1	20,10	27,34	34,59	45,94
2	19,02	26,99	31,64	47,74
3	19,34	23,58	32,36	49,14
4	16,57	24,42	30,82	46,97
5	16,83	28,93	30,16	42,78
6	18,34	26,26	33,48	48,11
Média	18,37	26,25	32,18	46,78
SD	1,41	1,97	1,66	2,24
COV	7,69%	7,50%	5,15%	4,78%
Mediana	18,68	26,63	32,00	47,36

Tabela 85 – Resistência à compressão axial – CAA-AGMR.

CP	Idade			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1	22,18	28,17	35,45	41,42
2	21,42	30,45	33,10	42,35
3	21,21	27,19	33,99	43,06
4	20,63	29,43	29,97	46,19
5	21,94	28,27	32,63	47,33
6	20,61	24,05	30,04	47,46
Média	21,33	27,93	32,53	44,64
SD	0,65	2,21	2,18	2,67
COV	3,06%	7,91%	6,70%	5,99%
Mediana	21,32	28,22	32,87	44,63

Tabela 86 – Resistência à compressão axial – CAA-EMP-REF.

CP	Idade			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1	15,13	21,68	27,16	40,86
2	15,17	21,60	27,94	42,77
3	16,94	21,25	28,49	44,48
4	15,39	24,30	27,13	46,14
5	14,24	21,40	26,35	41,21
6	15,59	22,78	27,90	43,85
Média	15,41	22,17	27,50	43,22
SD	0,88	1,18	0,76	2,02
COV	5,72%	5,30%	2,77%	4,66%
Mediana	15,28	21,64	27,53	43,31

Tabela 87 – Resistência à compressão axial – CAA-EMP-AGR.

CP	Idade			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1	12,33	19,33	24,05	33,00
2	11,24	18,30	23,59	31,69
3	14,92	15,13	23,37	35,09
4	12,53	15,65	22,43	31,75
5	12,10	16,88	23,73	30,66
6	13,88	18,62	23,71	30,52
Média	12,83	17,32	23,48	32,12
SD	1,33	1,70	0,56	1,71
COV	10,38%	9,82%	2,38%	5,32%
Mediana	12,43	17,59	23,65	31,72

Tabela 88 – Resistência à compressão axial – CAA-EMP-AMR.

CP	Idade			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1	10,01	17,86	19,47	24,16
2	12,61	16,04	20,17	25,40
3	11,29	18,29	22,88	25,58
4	14,25	16,22	22,04	29,93
5	13,03	17,30	19,50	27,29
6	14,71	14,64	21,18	25,45
Média	12,65	16,73	20,87	26,30
SD	1,78	1,35	1,40	2,04
COV	14,04%	8,08%	6,72%	7,75%
Mediana	12,82	16,76	20,68	25,52

Tabela 89 – Resistência à compressão axial – CAA-EMP-AGMR.

CP	Idade			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1	12,35	14,92	21,67	27,69
2	13,70	17,42	18,06	32,11
3	11,45	17,36	20,74	28,26
4	11,01	15,78	20,87	29,74
5	11,12	17,74	21,50	30,25
6	11,29	16,51	18,95	29,88
Média	11,82	16,62	20,30	29,66
SD	1,04	1,10	1,46	1,57
COV	8,78%	6,62%	7,20%	5,28%
Mediana	11,37	16,94	20,81	29,81

10.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Tabela 90 – Resistência à tração dos concretos dosados pelo método de Repette-Melo.

CP	CAA-REF		CAA-AGR		CAA-AMR		CAA-AGMR	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
1	3,95	4,68	3,28	4,07	3,19	4,68	2,86	3,66
2	3,48	5,31	2,99	3,73	3,56	4,16	3,27	3,96
3	3,46	5,13	2,87	4,57	3,00	4,08	3,07	3,97
4	3,40	4,92	3,04	5,30	3,25	4,22	2,44	4,59
5	3,51	4,23	3,35	4,36	3,15	4,35	2,76	4,66
6	3,05	4,84	3,26	5,45	2,83	4,63	2,78	4,35
Média	3,48	4,85	3,13	4,58	3,16	4,35	2,86	4,20
SD	0,29	0,38	0,19	0,68	0,25	0,25	0,28	0,40
COV	8,27%	7,76%	6,11%	14,83%	7,79%	5,75%	9,94%	9,46%
Mediana	3,47	4,88	3,15	4,47	3,17	4,29	2,82	4,16

Tabela 91 – Resistência à tração dos concretos dosados com base no conceito de empacotamento de partículas.

CP	CAA-EMP-REF		CAA-EMP-AGR		CAA-EMP-AMR		CAA-EMP-AGMR	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
1	2,54	4,46	2,27	3,65	1,90	2,72	2,30	3,37
2	2,77	3,92	2,56	3,75	1,79	2,47	2,06	3,46
3	2,54	3,45	2,39	3,96	2,14	2,99	2,04	3,22
4	1,95	4,12	1,73	4,04	2,17	2,47	2,15	3,13
5	2,81	4,42	1,97	4,34	2,03	3,19	1,90	3,82
6	2,10	4,29	2,53	3,70	2,12	3,41	1,66	3,11
Média	2,45	4,11	2,24	3,91	2,03	2,88	2,02	3,35
SD	0,35	0,38	0,33	0,26	0,15	0,39	0,22	0,27
COV	14,37%	9,25%	14,70%	6,69%	7,46%	13,48%	10,88%	7,96%
Mediana	2,54	4,21	2,33	3,86	2,08	2,86	2,05	3,30

10.2.3 Módulo de elasticidade estático

Tabela 92 – Módulo de elasticidade estático dos concretos aos 28 dias.

CP	CAA-REF	CAA-AGR	CAA-AMR	CAA-AGMR	CAA-EMP-REF	CAA-EMP-AGR	CAA-EMP-AMR	CAA-EMP-AGMR
1	32,71	32,94	28,12	29,07	25,22	18,36	18,42	24,03
2	31,80	28,45	30,21	25,38	20,78	18,28	19,07	26,84
3	31,55	31,09	25,19	26,98	25,95	19,90	16,41	21,91
4	30,02	31,08	30,14	28,48	23,30	20,55	18,37	25,32
5	30,94	30,33	31,80	31,96	20,55	22,27	21,98	24,55
6	28,96	30,90	27,49	30,52	22,89	20,32	17,84	25,26
Média	31,00	30,80	28,83	28,73	23,12	19,95	18,68	24,65
SD	1,34	1,45	2,37	2,37	2,22	1,50	1,85	1,64
COV	4,33%	4,70%	8,21%	8,25%	9,59%	7,50%	9,89%	6,67%
Mediana	31,25	30,99	29,13	28,78	23,10	20,11	18,40	24,91

10.2.4 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Tabela 93 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-REF.

CP	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)		
			Seca	Saturada	Real
1	4,80	11,42	2,379	2,493	2,686
2	4,64	10,71	2,307	2,414	2,583
3	5,26	12,05	2,291	2,412	2,605
4	4,40	10,63	2,415	2,522	2,703
Média	4,78	11,20	2,348	2,460	2,644
SD	0,36	0,67	0,059	0,056	0,059
COV	7,56%	5,95%	2,51%	2,27%	2,22%
Mediana	4,72	11,06	2,343	2,453	2,645

Tabela 94 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-AGR.

CP	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm³)		
			Seca	Saturada	Real
1	5,30	12,21	2,306	2,428	2,626
2	5,69	13,03	2,288	2,419	2,631
3	5,10	11,85	2,324	2,443	2,637
4	5,02	11,57	2,310	2,425	2,612
Média	5,28	12,17	2,307	2,429	2,627
SD	0,30	0,63	0,015	0,010	0,010
COV	5,74%	5,22%	0,64%	0,42%	0,40%
Mediana	5,20	12,03	2,308	2,427	2,629

Tabela 95 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-AMR.

CP	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm³)		
			Seca	Saturada	Real
1	6,36	14,68	2,309	2,456	2,706
2	5,62	13,07	2,326	2,457	2,676
3	6,73	15,33	2,284	2,437	2,697
4	7,08	16,14	2,280	2,441	2,718
Média	6,45	14,81	2,300	2,448	2,700
SD	0,63	1,31	0,022	0,010	0,018
COV	9,72%	8,82%	0,96%	0,42%	0,67%
Mediana	6,54	15,01	2,296	2,448	2,702

Tabela 96 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-AGMR.

CP	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm³)		
			Seca	Saturada	Real
1	6,09	14,00	2,298	2,438	2,620
2	6,68	15,35	2,298	2,452	2,651
3	6,82	15,77	2,312	2,469	2,676
4	6,48	14,58	2,250	2,396	2,578
Média	6,52	14,93	2,289	2,439	2,631
SD	0,32	0,79	0,027	0,031	0,042
COV	4,88%	5,30%	1,19%	1,29%	1,61%
Mediana	6,58	14,97	2,298	2,445	2,636

Tabela 97 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-EMP-REF.

CP	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm³)		
			Seca	Saturada	Real
1	6,18	14,17	2,295	2,436	2,674
2	5,13	11,98	2,333	2,453	2,651
3	6,65	15,16	2,279	2,431	2,687
4	6,59	15,02	2,281	2,431	2,684
Média	6,14	14,08	2,297	2,438	2,674
SD	0,70	1,47	0,025	0,010	0,016
COV	11,42%	10,43%	1,09%	0,43%	0,61%
Mediana	6,38	14,60	2,288	2,434	2,679

Tabela 98 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-EMP-AGR.

CP	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)		
			Seca	Saturada	Real
1	6,38	14,84	2,325	2,474	2,731
2	7,79	17,25	2,213	2,386	2,675
3	7,36	16,54	2,247	2,413	2,693
4	7,30	16,38	2,252	2,416	2,692
Média	7,21	16,25	2,260	2,422	2,698
SD	0,59	1,02	0,047	0,037	0,023
COV	8,25%	6,26%	2,09%	1,53%	0,87%
Mediana	7,33	16,46	2,250	2,414	2,692

Tabela 99 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-EMP-AMR.

CP	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)		
			Seca	Saturada	Real
1	7,49	16,80	2,243	2,411	2,695
2	7,73	17,14	2,219	2,390	2,678
3	7,67	17,08	2,227	2,398	2,685
4	7,38	16,50	2,236	2,401	2,678
Média	7,57	16,88	2,231	2,400	2,684
SD	0,16	0,29	0,010	0,008	0,008
COV	2,12%	1,75%	0,47%	0,35%	0,31%
Mediana	7,58	16,94	2,231	2,399	2,682

Tabela 100 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica – CAA-EMP-AGMR.

CP	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)		
			Seca	Saturada	Real
1	6,64	14,94	2,228	2,376	2,616
2	7,28	16,17	2,220	2,381	2,648
3	7,27	16,28	2,241	2,403	2,676
4	7,30	16,05	2,199	2,359	2,619
Média	7,12	15,86	2,222	2,380	2,640
SD	0,32	0,62	0,018	0,018	0,028
COV	4,52%	3,91%	0,79%	0,77%	1,07%
Mediana	7,27	16,11	2,224	2,379	2,633

10.2.5 Absorção de água por capilaridade

Tabela 101 – Absorção de água por capilaridade – CAA-REF.

CP	Absorção Capilar (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	0,063	0,080	0,103	0,110	0,120
2	0,048	0,065	0,083	0,094	0,101
3	0,061	0,080	0,109	0,119	0,127
4	0,054	0,072	0,093	0,092	0,101
Média	0,057	0,074	0,097	0,104	0,112
SD	0,007	0,007	0,011	0,013	0,013
COV	12,13%	9,74%	11,78%	12,50%	11,85%
Mediana	0,058	0,076	0,098	0,102	0,111

Tabela 102 – Absorção de água por capilaridade – CAA-AGR.

CP	Absorção Capilar (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	0,093	0,110	0,144	0,166	0,177
2	0,080	0,089	0,111	0,127	0,143
3	0,099	0,117	0,154	0,180	0,196
4	0,100	0,120	0,160	0,182	0,197
Média	0,093	0,109	0,142	0,164	0,178
SD	0,009	0,014	0,022	0,025	0,025
COV	10,05%	12,74%	15,25%	15,54%	14,13%
Mediana	0,096	0,114	0,149	0,173	0,187

Tabela 103 – Absorção de água por capilaridade – CAA-AMR.

CP	Absorção Capilar (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	0,030	0,051	0,127	0,174	0,193
2	0,034	0,054	0,147	0,193	0,208
3	0,035	0,059	0,154	0,197	0,227
4	0,040	0,058	0,135	0,185	0,204
Média	0,035	0,056	0,141	0,187	0,208
SD	0,004	0,004	0,012	0,010	0,014
COV	12,56%	7,04%	8,53%	5,50%	6,82%
Mediana	0,034	0,056	0,141	0,189	0,206

Tabela 104 – Absorção de água por capilaridade – CAA-AGMR.

CP	Absorção Capilar (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	0,158	0,195	0,265	0,291	0,316
2	0,158	0,201	0,258	0,291	0,318
3	0,139	0,170	0,219	0,247	0,268
4	0,171	0,208	0,276	0,309	0,334
Média	0,157	0,193	0,255	0,284	0,309
SD	0,013	0,016	0,025	0,027	0,029
COV	8,39%	8,48%	9,69%	9,33%	9,30%
Mediana	0,158	0,198	0,262	0,291	0,317

Tabela 105 – Absorção de água por capilaridade – CAA-EMP-REF.

CP	Absorção Capilar (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	0,046	0,056	0,145	0,191	0,209
2	0,035	0,062	0,157	0,199	0,222
3	0,038	0,065	0,157	0,201	0,219
4	0,044	0,068	0,164	0,208	0,227
Média	0,041	0,063	0,156	0,200	0,219
SD	0,005	0,005	0,008	0,007	0,008
COV	11,96%	7,95%	5,06%	3,48%	3,46%
Mediana	0,041	0,063	0,157	0,200	0,220

Tabela 106 – Absorção de água por capilaridade – CAA-EMP-AGR.

CP	Absorção Capilar (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	0,195	0,254	0,458	0,570	0,681
2	0,177	0,229	0,396	0,491	0,587
3	0,169	0,221	0,389	0,486	0,583
4	0,166	0,216	0,385	0,484	0,581
Média	0,177	0,230	0,407	0,508	0,608
SD	0,013	0,017	0,034	0,041	0,049
COV	7,51%	7,19%	8,47%	8,17%	8,02%
Mediana	0,173	0,225	0,392	0,489	0,585

Tabela 107 – Absorção de água por capilaridade – CAA-EMP-AMR.

CP	Absorção Capilar (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	0,175	0,221	0,385	0,482	0,577
2	0,182	0,232	0,428	0,540	0,651
3	0,160	0,203	0,348	0,438	0,527
4	0,208	0,267	0,454	0,560	0,665
Média	0,181	0,231	0,404	0,505	0,605
SD	0,020	0,027	0,047	0,056	0,065
COV	11,05%	11,80%	11,60%	11,01%	10,69%
Mediana	0,178	0,227	0,407	0,511	0,614

Tabela 108 – Absorção de água por capilaridade – CAA-EMP-AGMR.

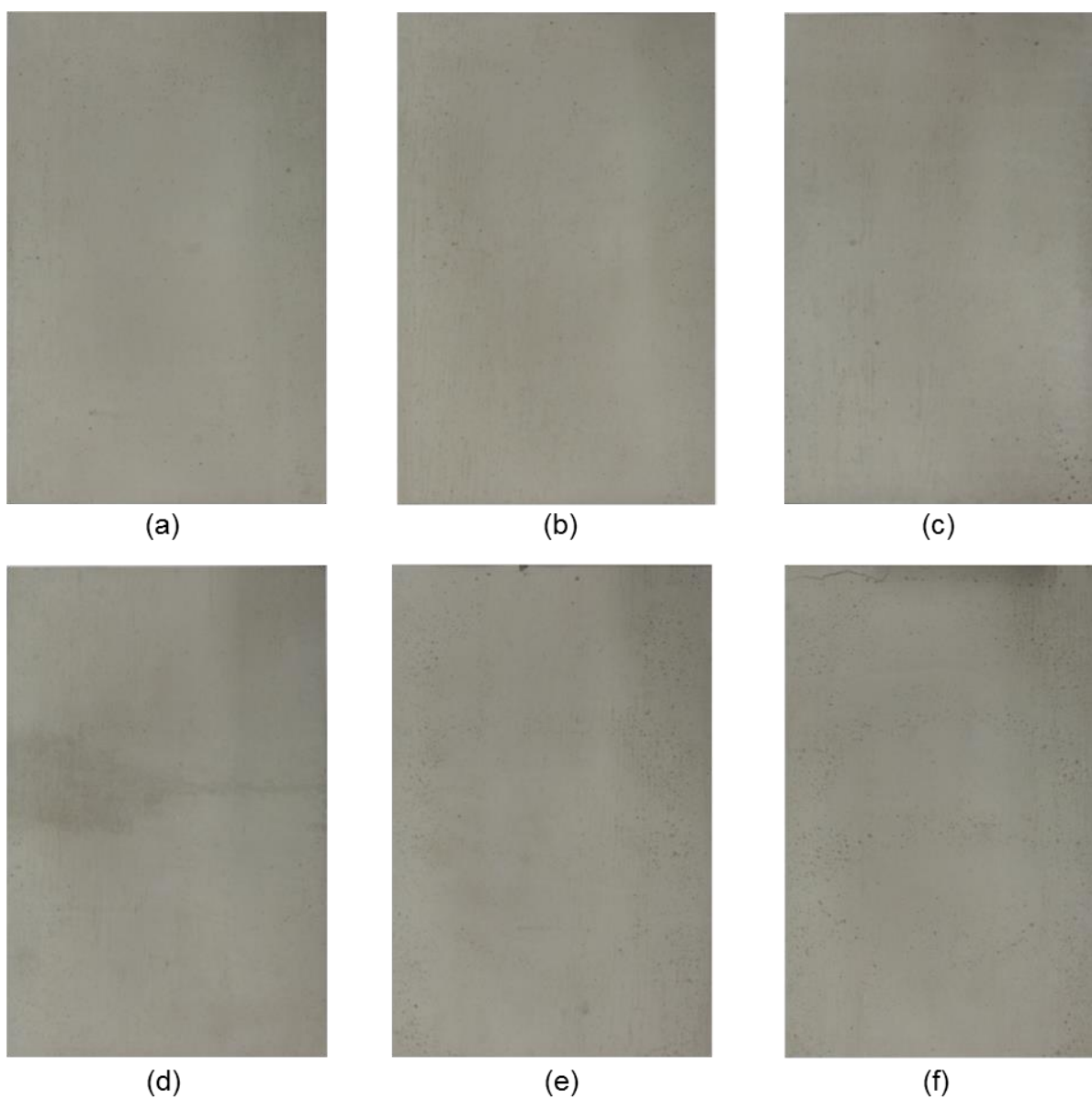
CP	Absorção Capilar (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	0,149	0,225	0,317	0,385	0,524
2	0,126	0,202	0,368	0,436	0,615
3	0,163	0,241	0,403	0,508	0,657
4	0,115	0,201	0,329	0,444	0,588
Média	0,138	0,217	0,354	0,443	0,596
SD	0,022	0,019	0,039	0,050	0,056
COV	15,73%	8,90%	11,04%	11,38%	9,36%
Mediana	0,138	0,214	0,349	0,440	0,602

10.3 Acabamento superficial

10.3.1 Argamassas

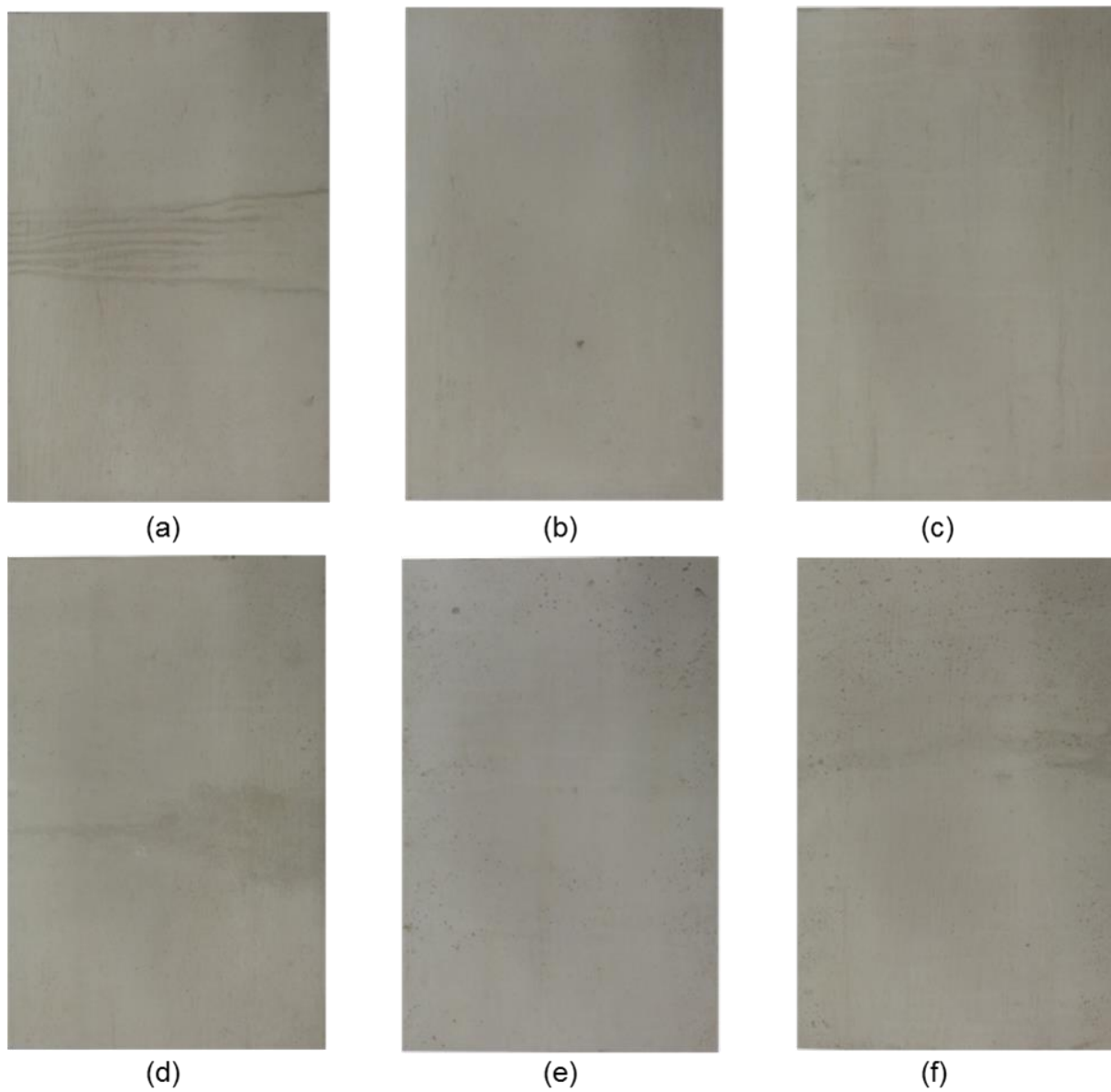
10.3.1.1 Imagens sem tratamento

Figura 71 – Placas da argamassa ARG-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



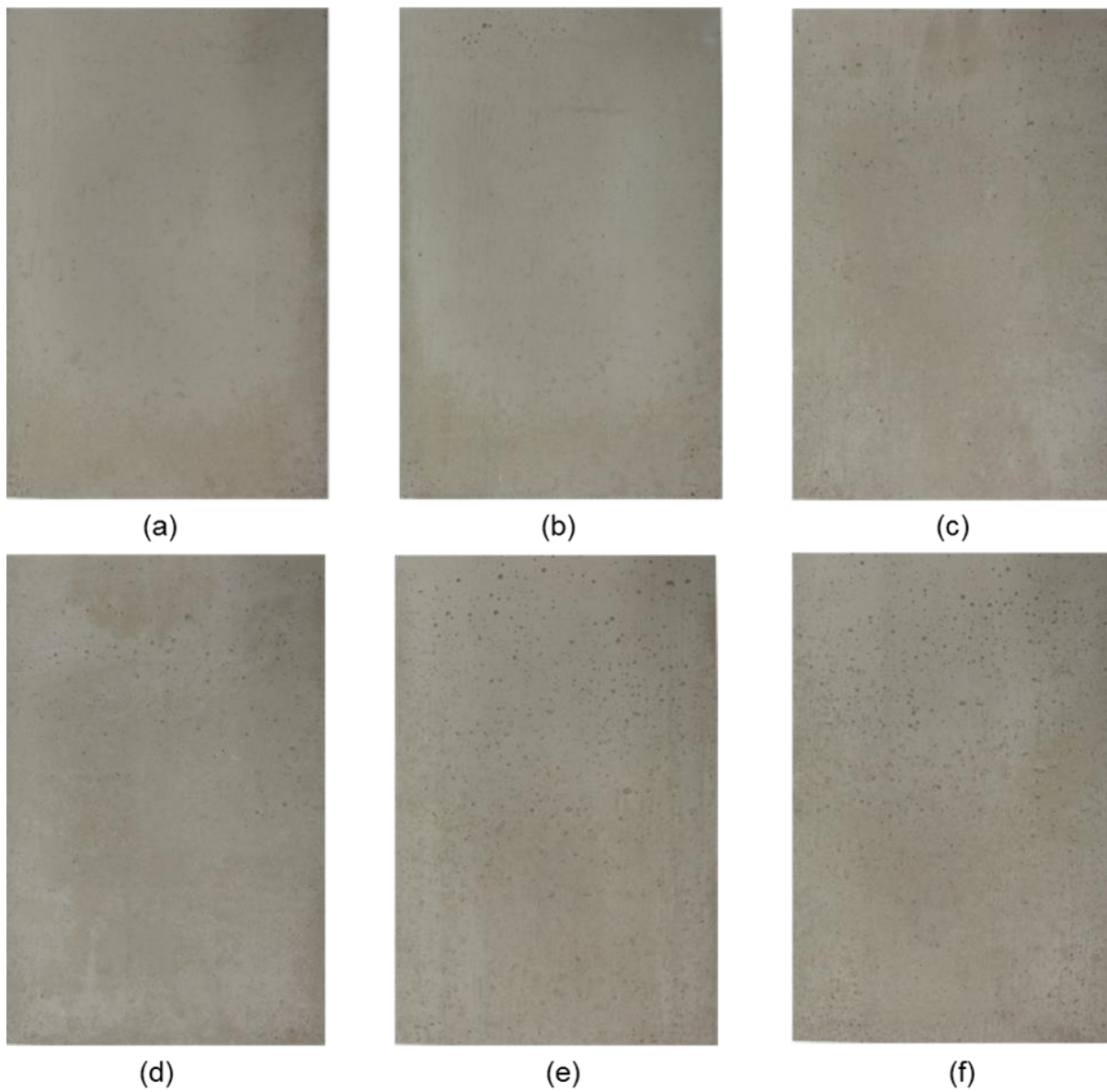
Escala: 1:4.

Figura 72 – Placas da argamassa ARG-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



Escala: 1:4.

Figura 73 – Placas da argamassa ARG-EMP-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



Escala: 1:4.

Figura 74 – Placas da argamassa ARG-EMP-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

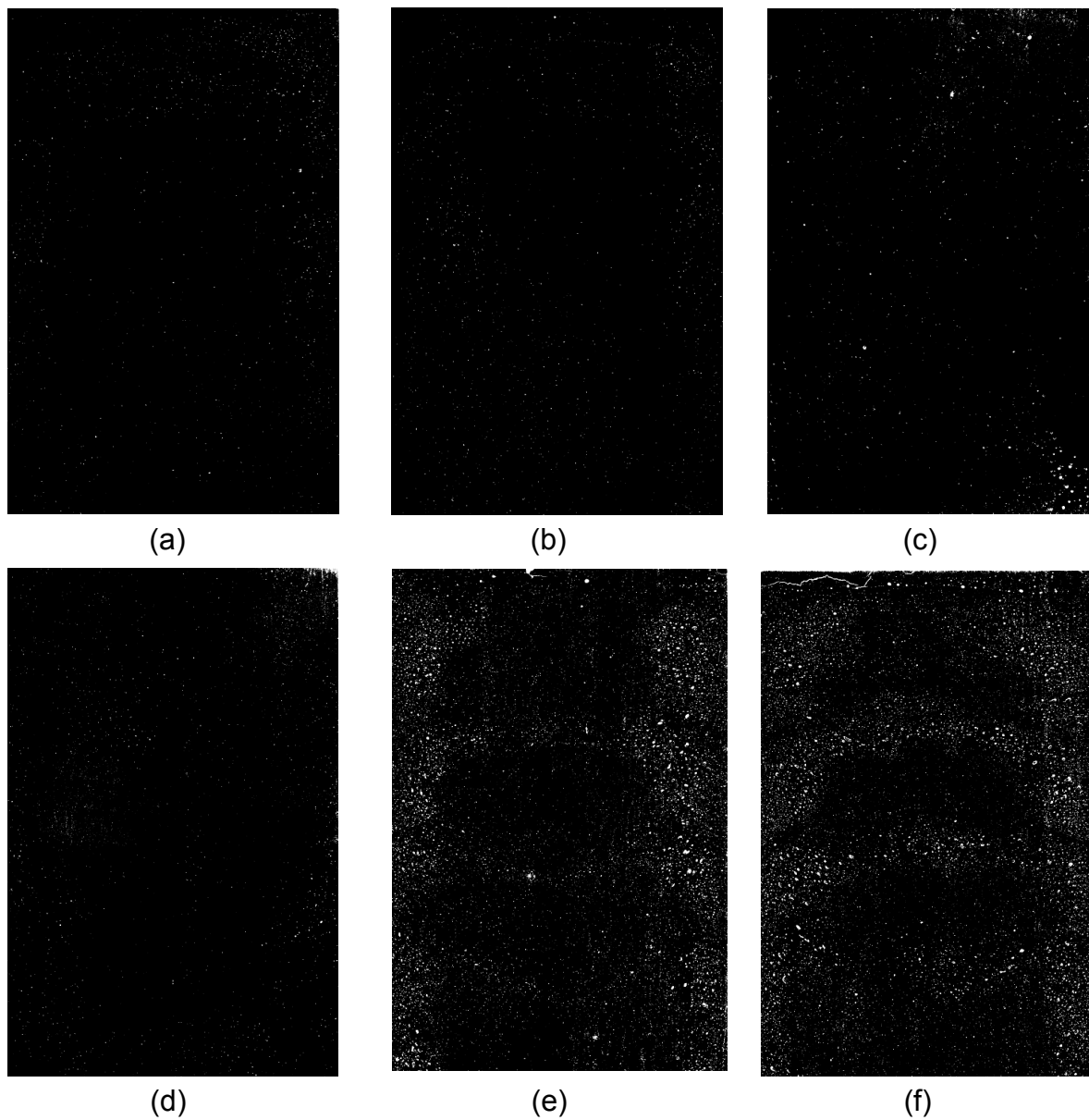


(f)

Escala: 1:4.

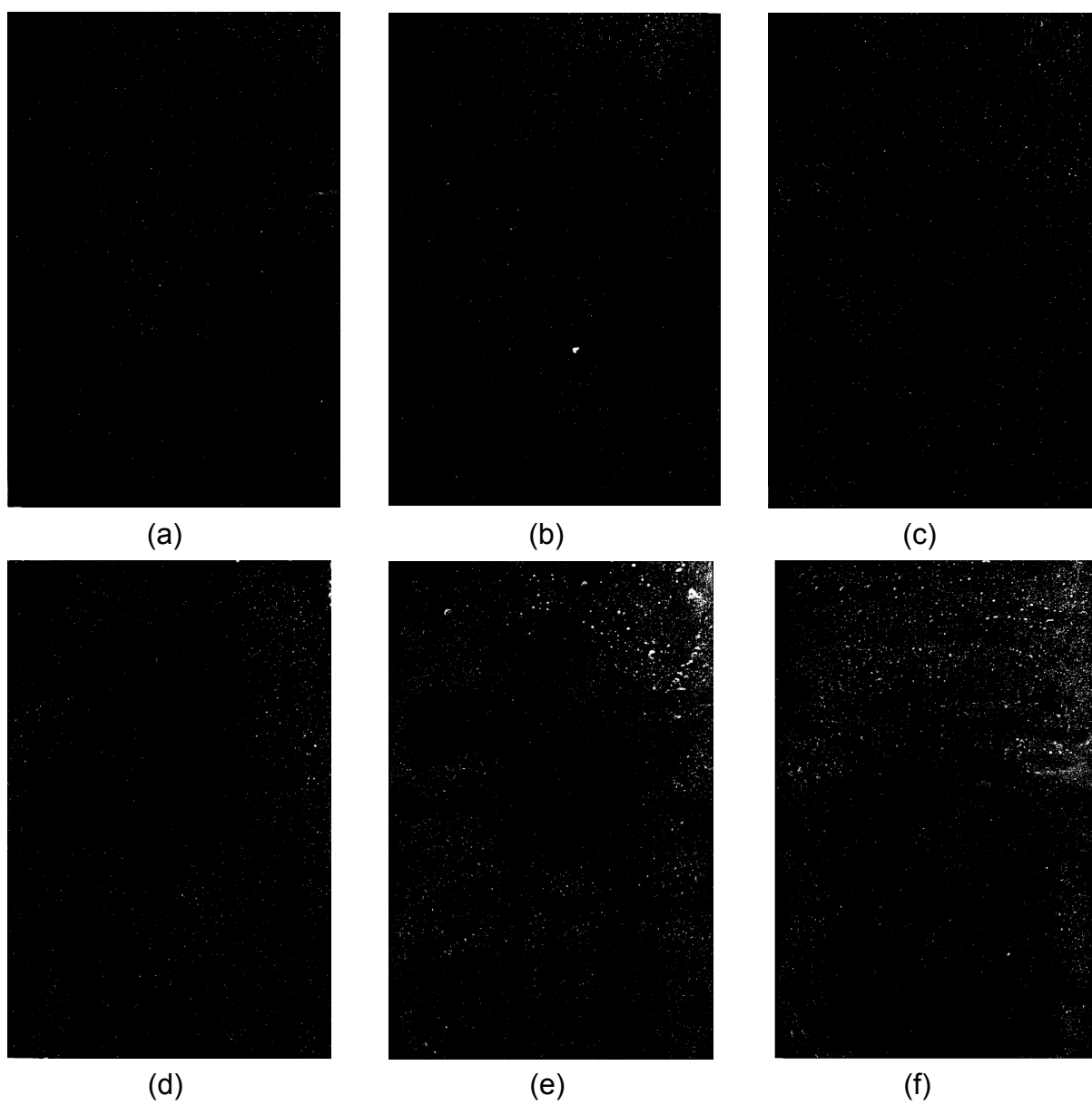
10.3.1.2 Imagens tratadas

Figura 75 – Tratamento de imagem das placas da argamassa ARG-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



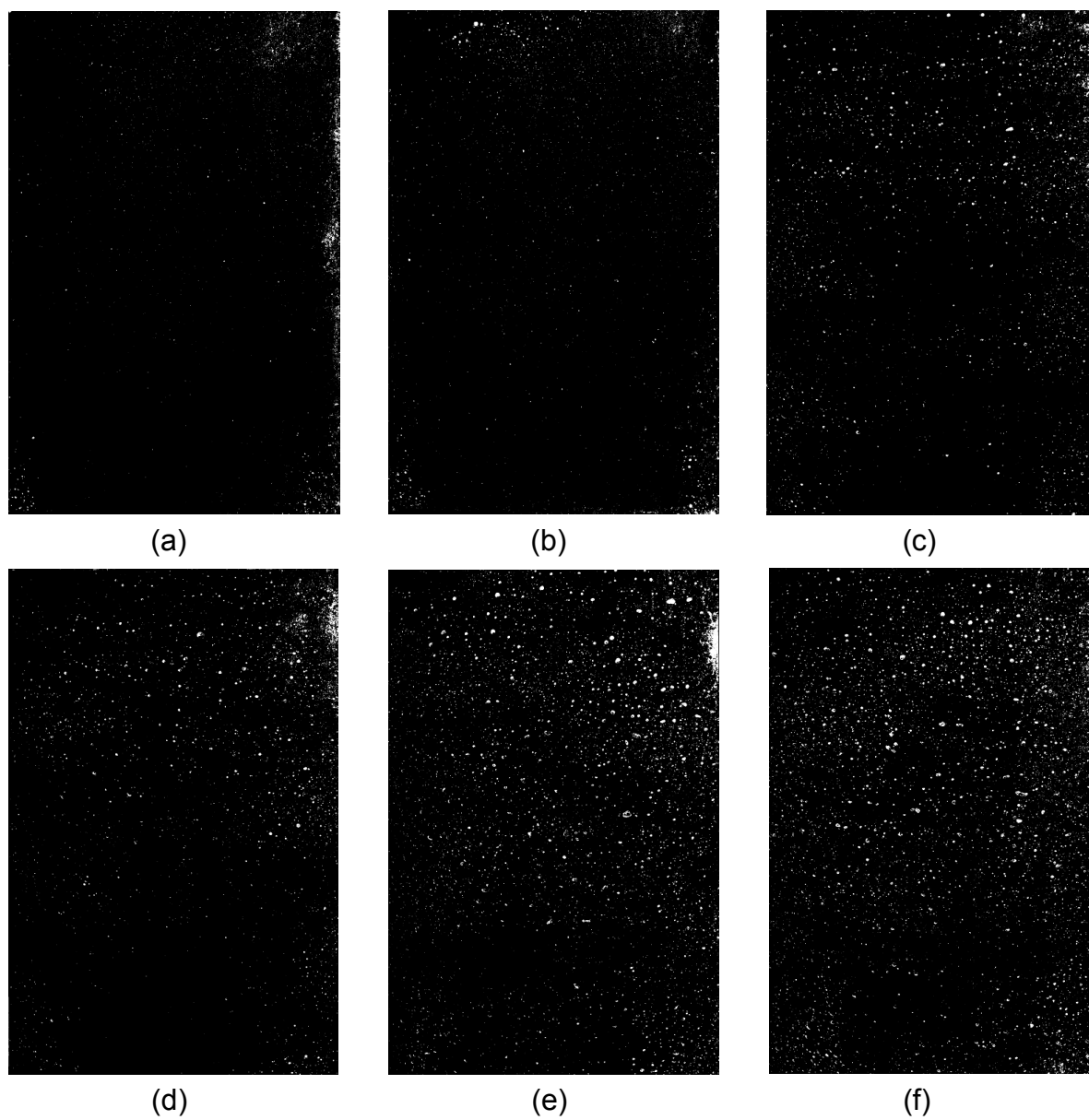
Escala: 1:4.

Figura 76 – Tratamento de imagem das placas da argamassa ARG-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



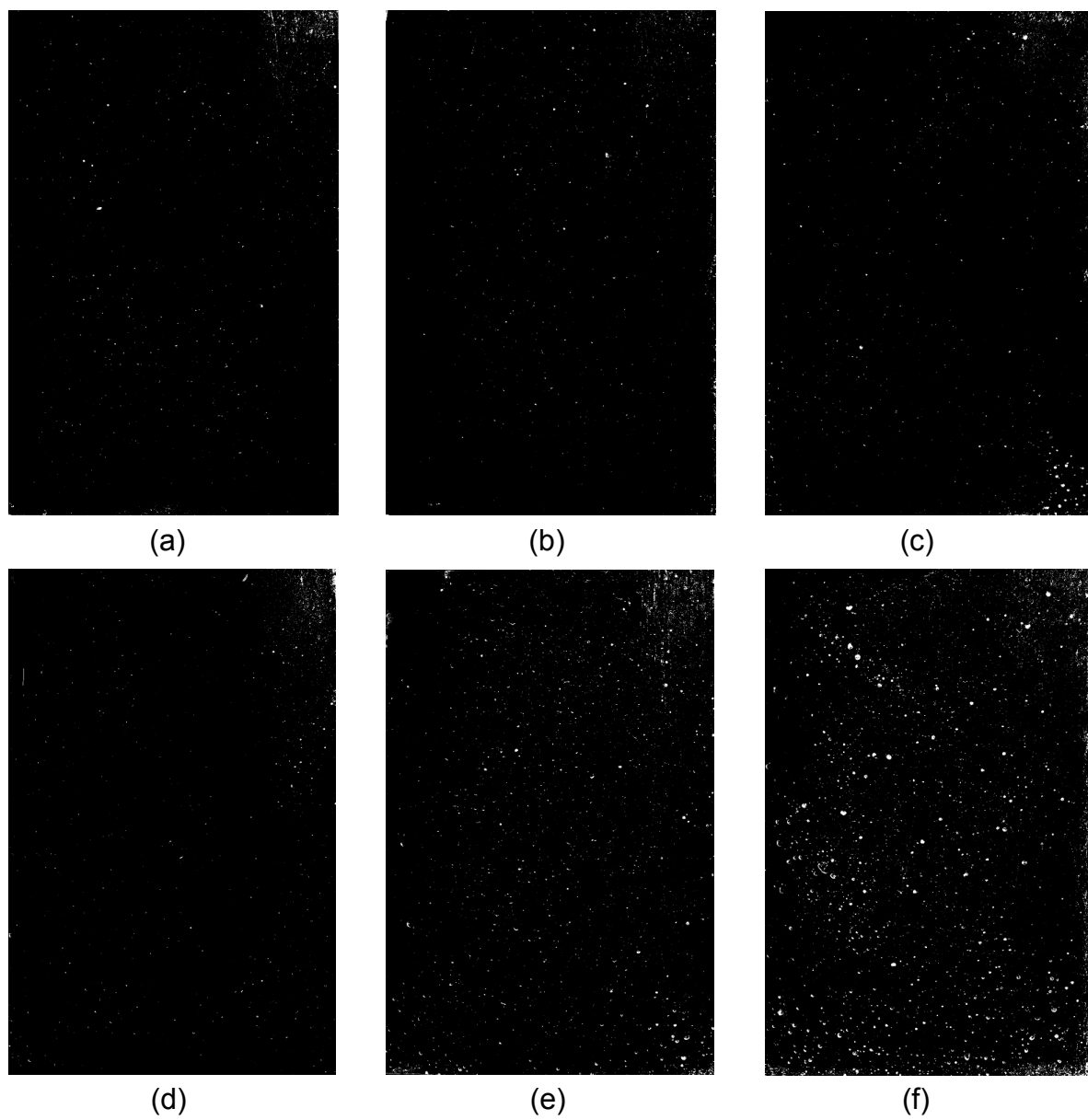
Escala: 1:4.

Figura 77 – Tratamento de imagem das placas da argamassa ARG-EMP-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



Escala: 1:4.

Figura 78 – Tratamento de imagem das placas da argamassa ARG-EMP-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



Escala: 1:4.

10.3.2 Concretos

10.3.2.1 Imagens sem tratamento

Figura 79 – Placas do concreto CAA-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Escala: 1:5.

Figura 80 – Placas do concreto CAA-AGR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



(a)



(b)



(c)



(d)



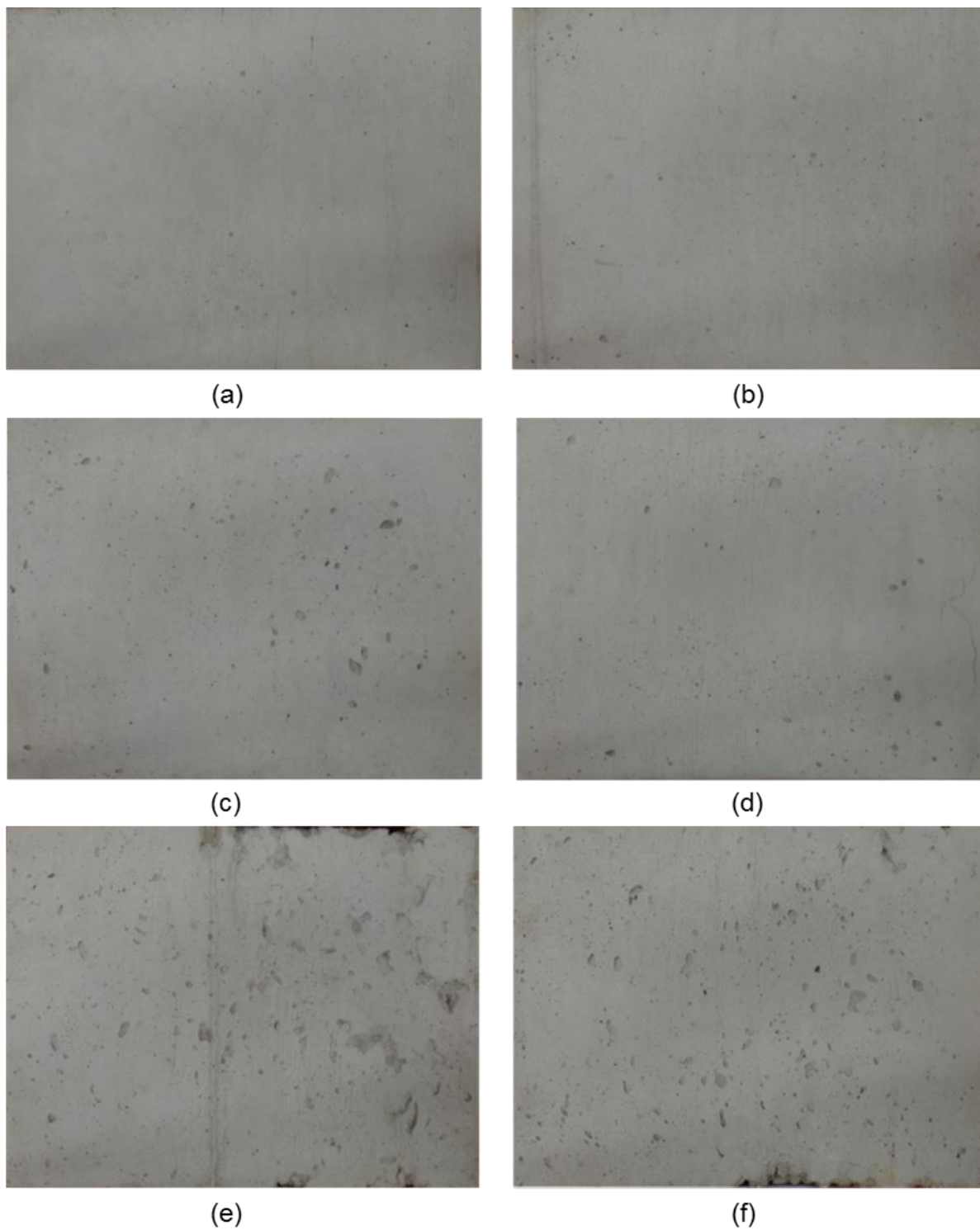
(e)



(f)

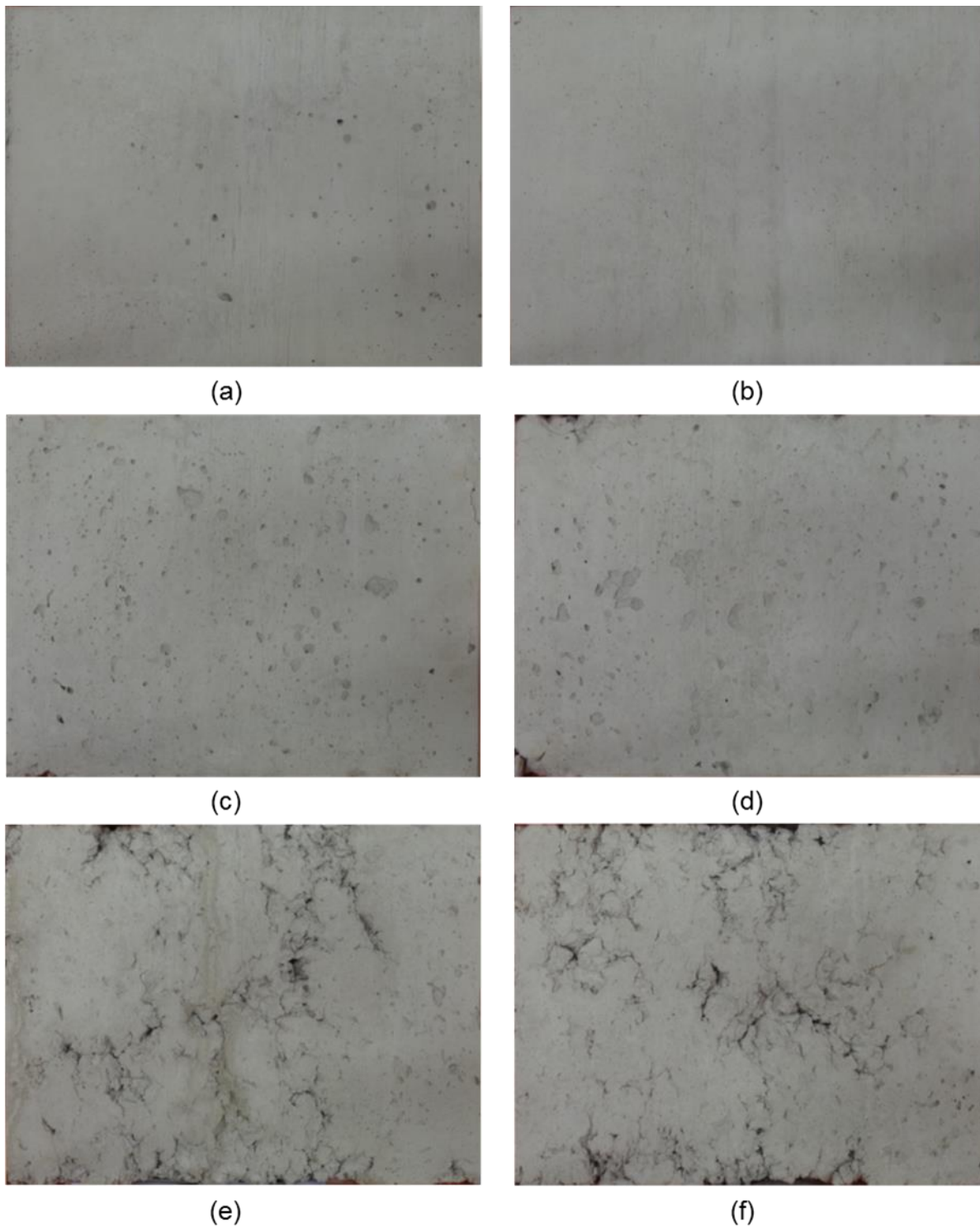
Escala: 1:5.

Figura 81 – Placas do concreto CAA-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



Escala: 1:5.

Figura 82 – Placas do concreto CAA-AGMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



Escala: 1:5.

Figura 83 – Placas do concreto CAA-EMP-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



(a)



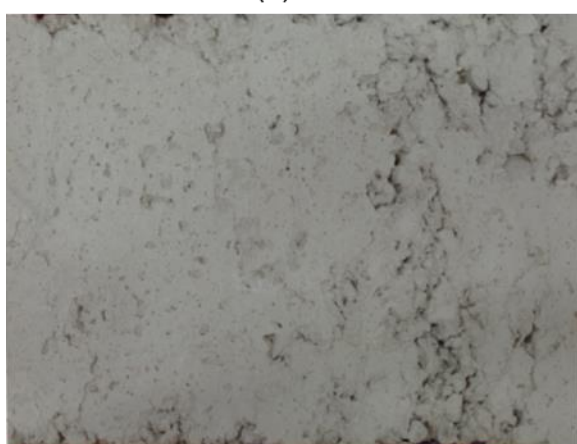
(b)



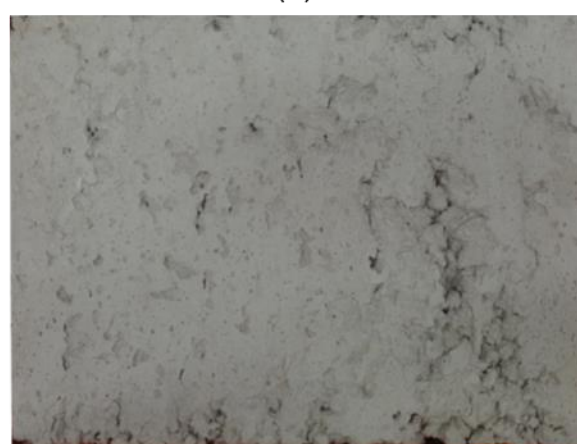
(c)



(d)



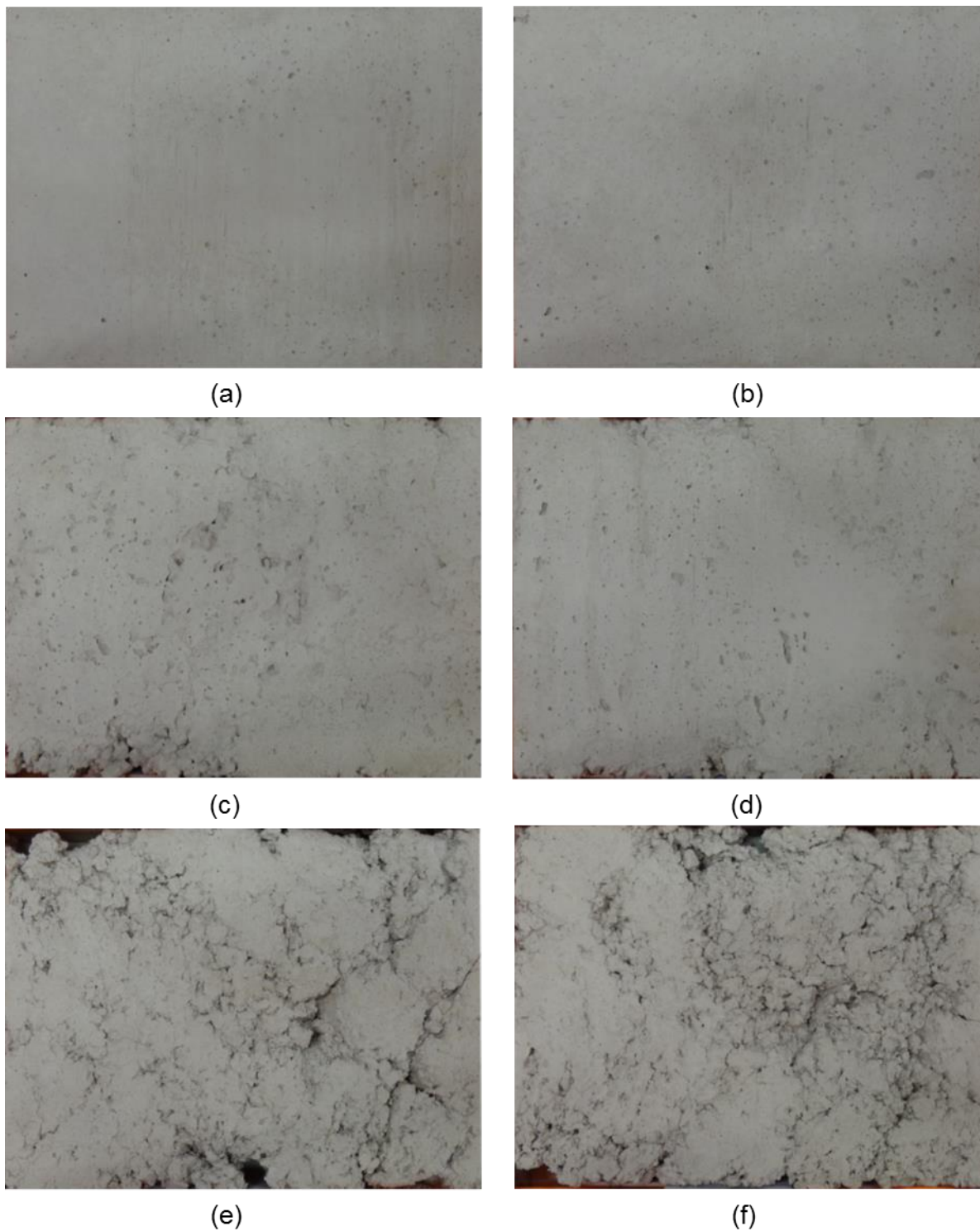
(e)



(f)

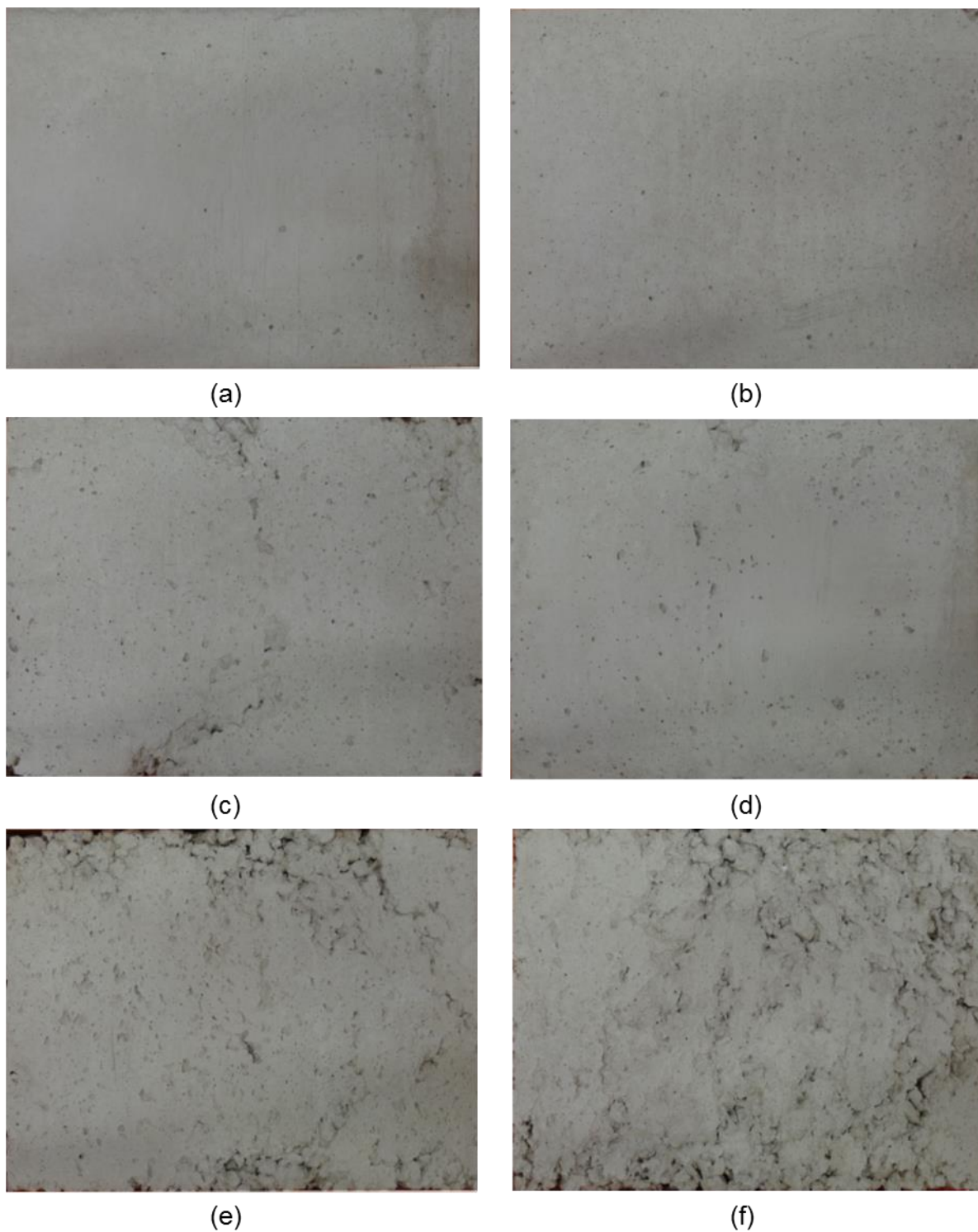
Escala: 1:5.

Figura 84 – Placas do concreto CAA-EMP-AGR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



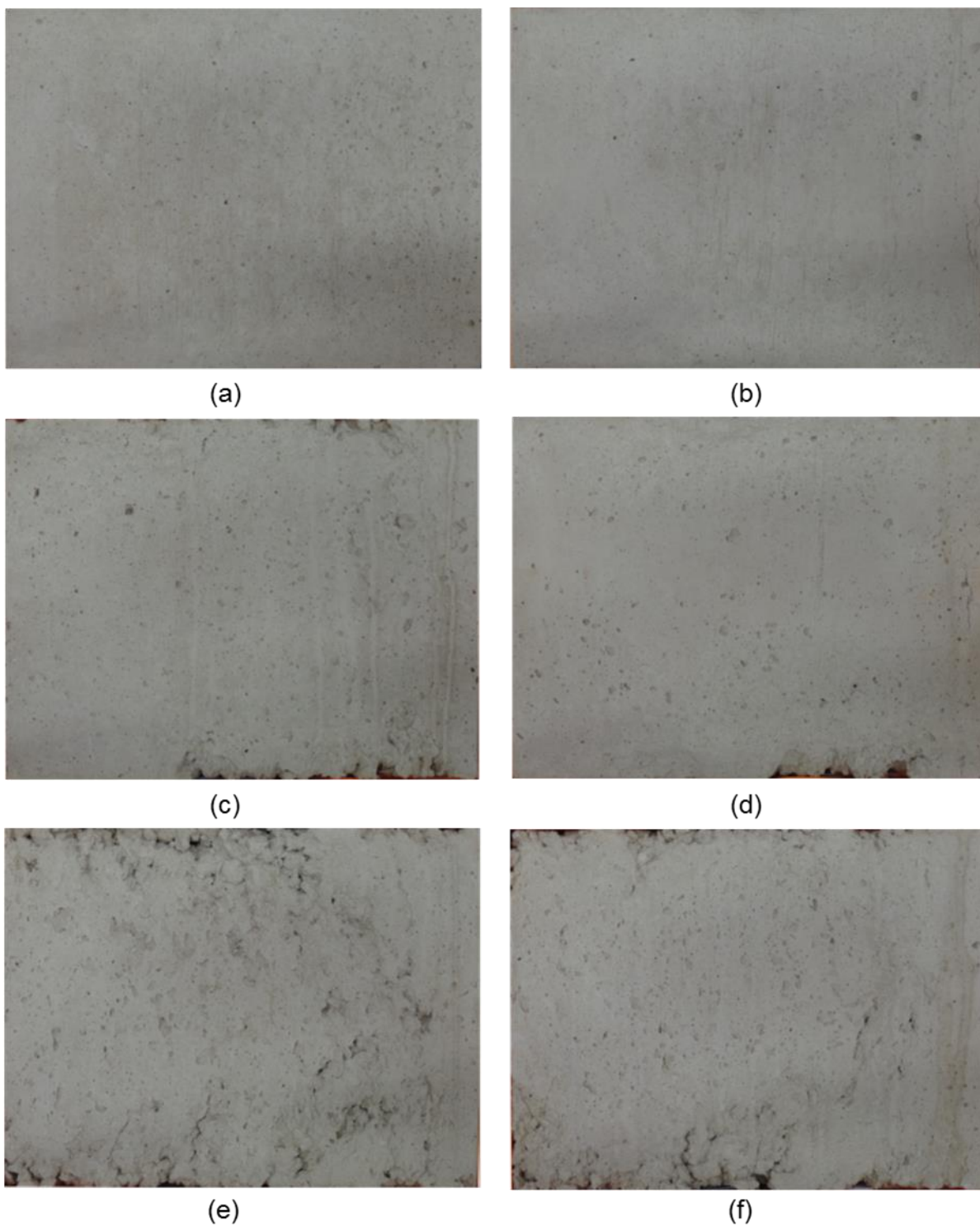
Escala: 1:5.

Figura 85 – Placas do concreto CAA-EMP-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



Escala: 1:5.

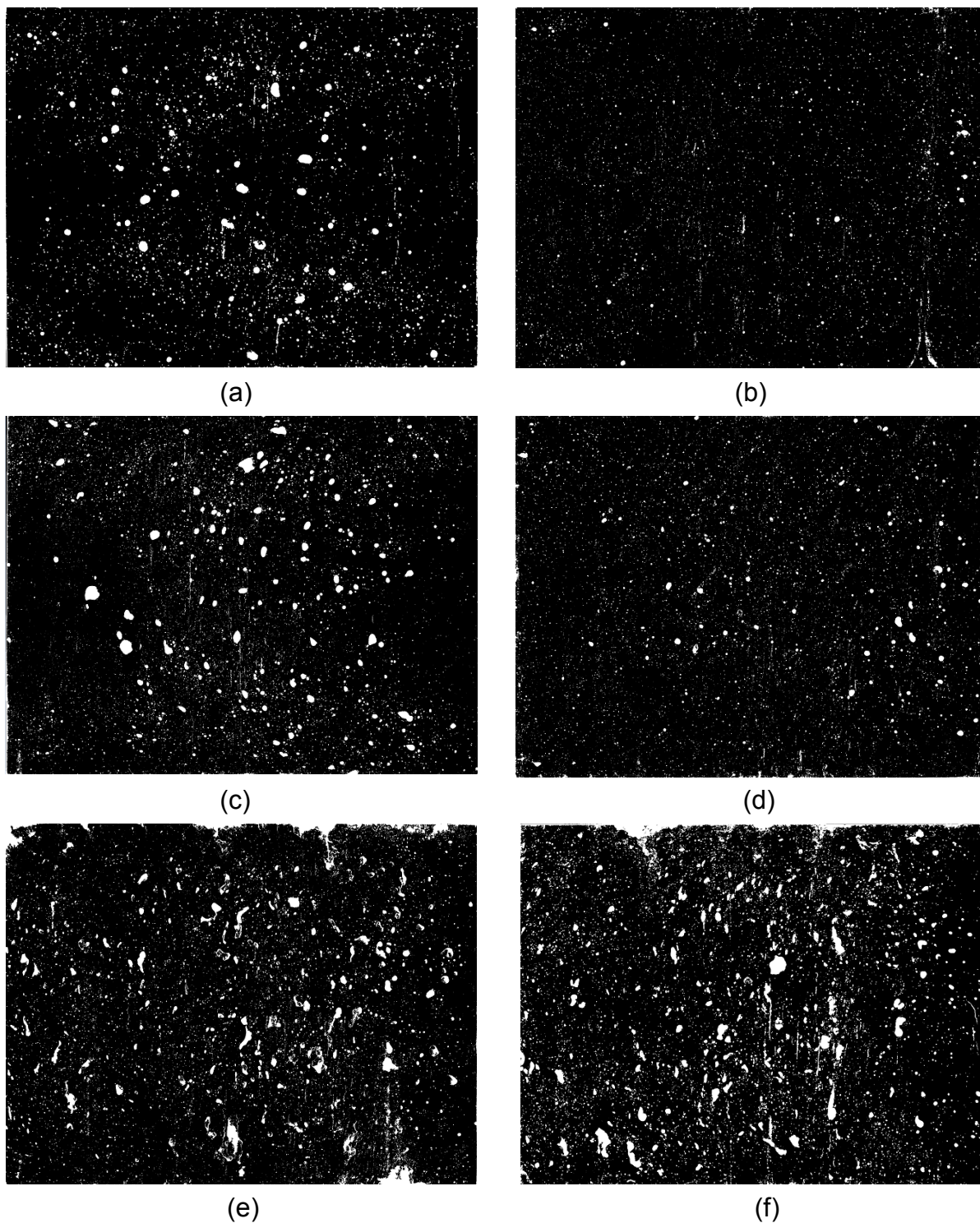
Figura 86 – Placas do concreto CAA-EMP-AGMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



Escala: 1:5.

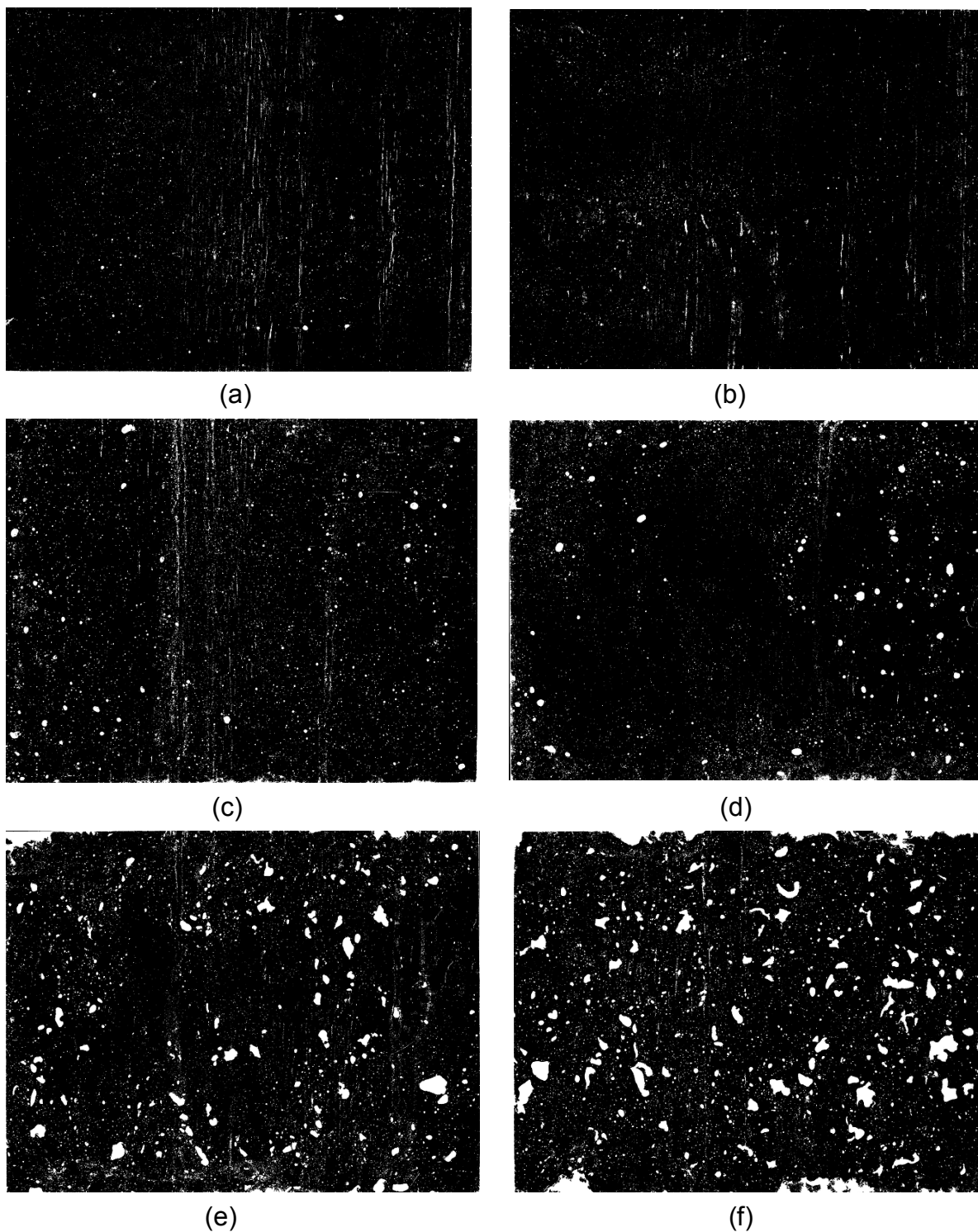
10.3.2.2 Imagens com tratamento

Figura 87 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



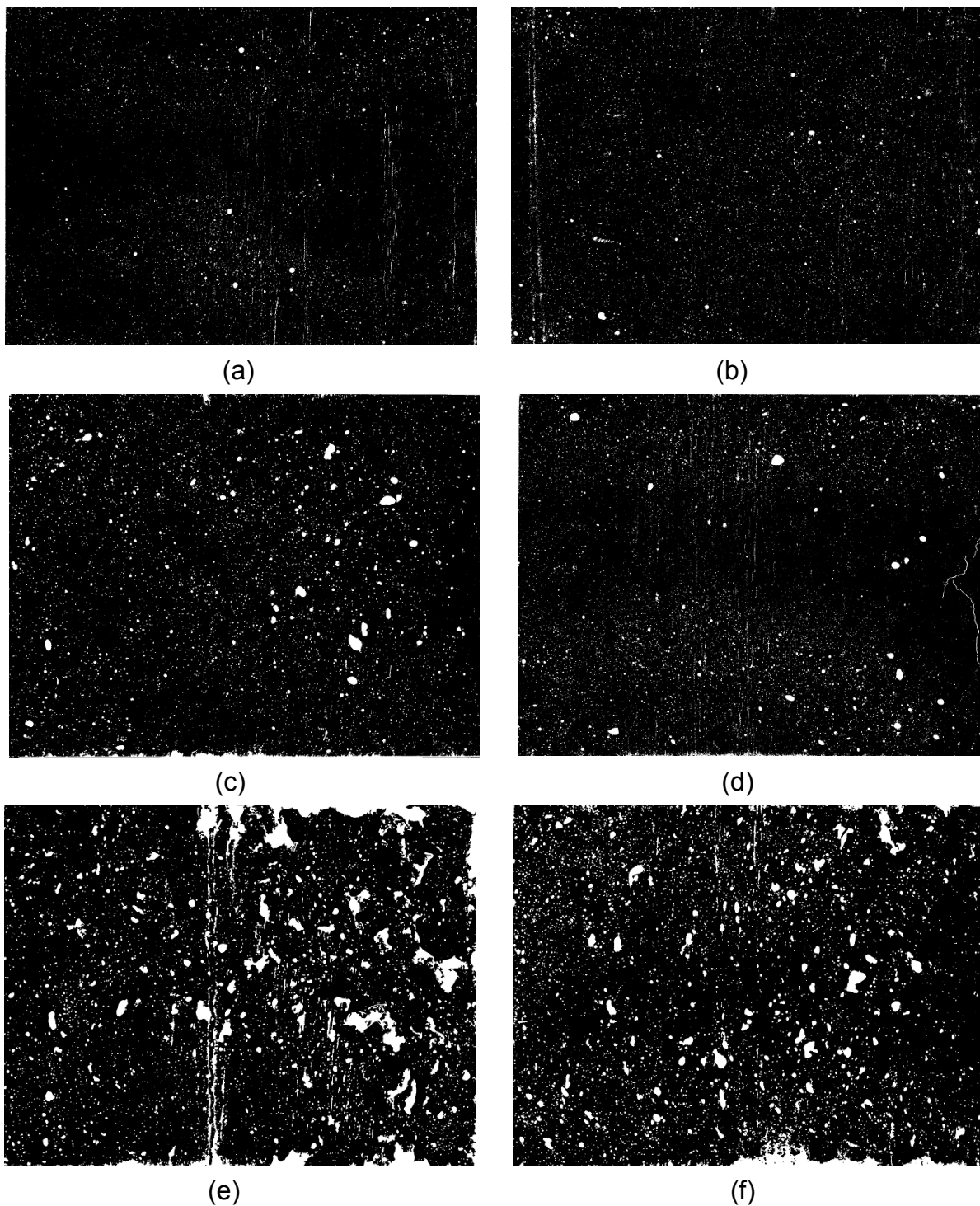
Escala: 1:5.

Figura 88 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-AGR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



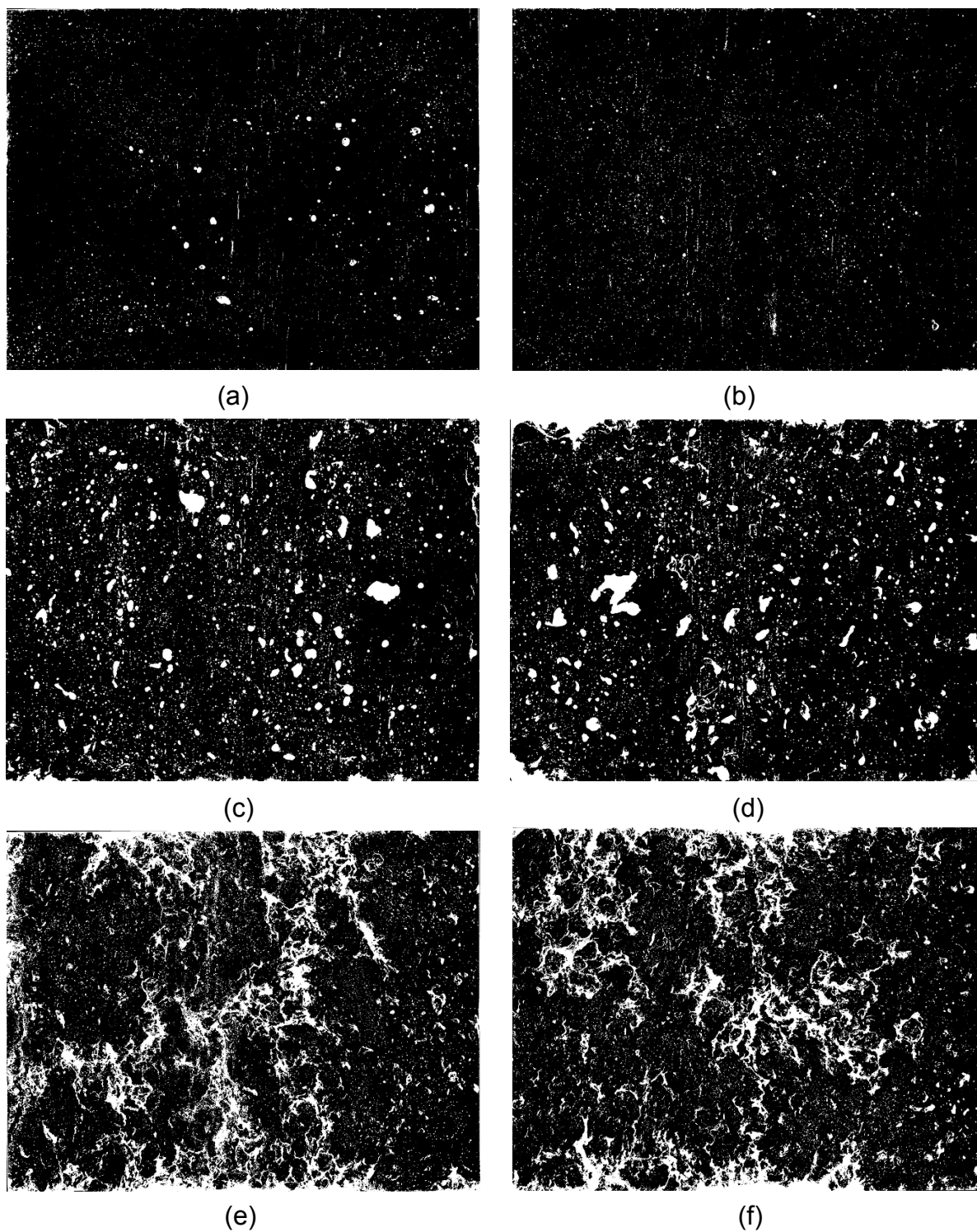
Escala: 1:5.

Figura 89 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



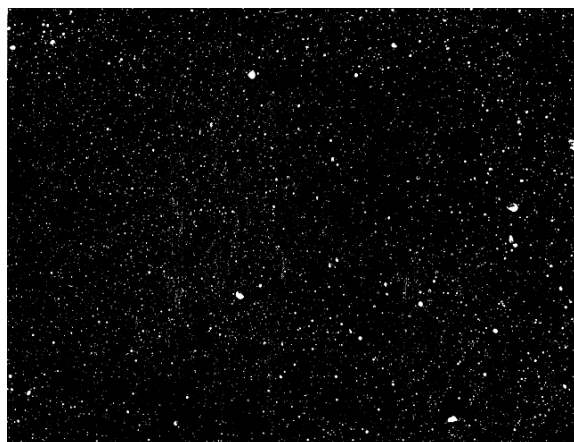
Escala: 1:5.

Figura 90 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-AGMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.

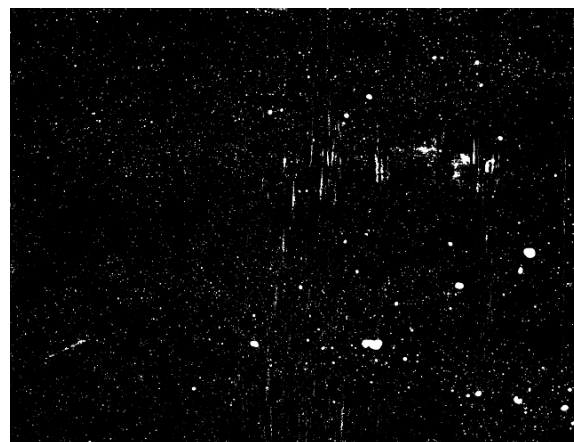


Escala: 1:5.

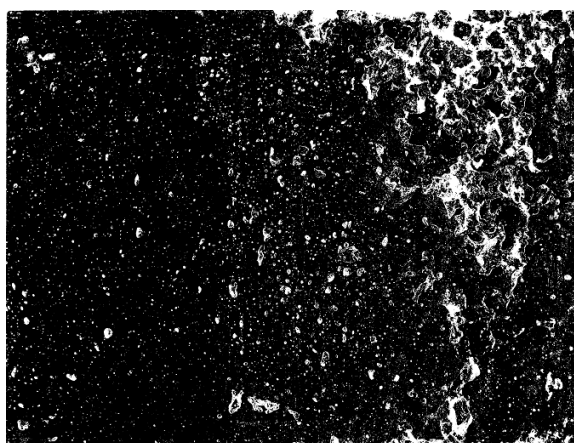
Figura 91 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-EMP-REF: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



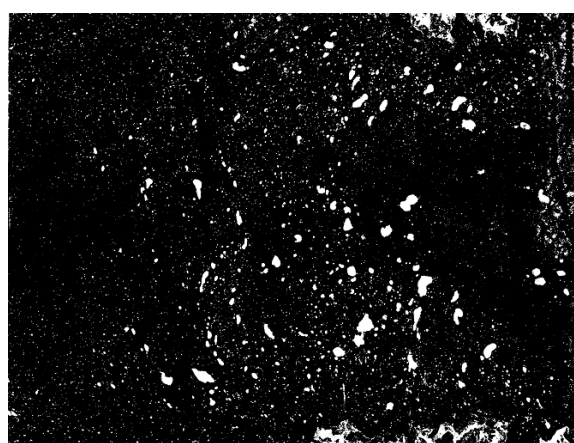
(a)



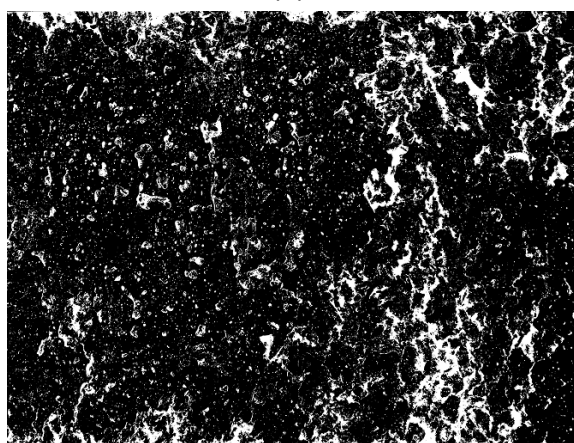
(b)



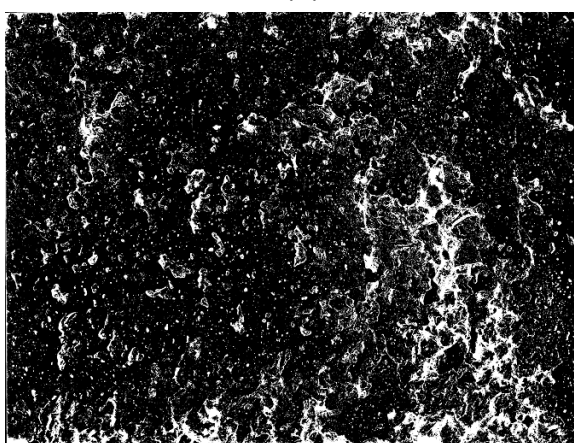
(c)



(d)



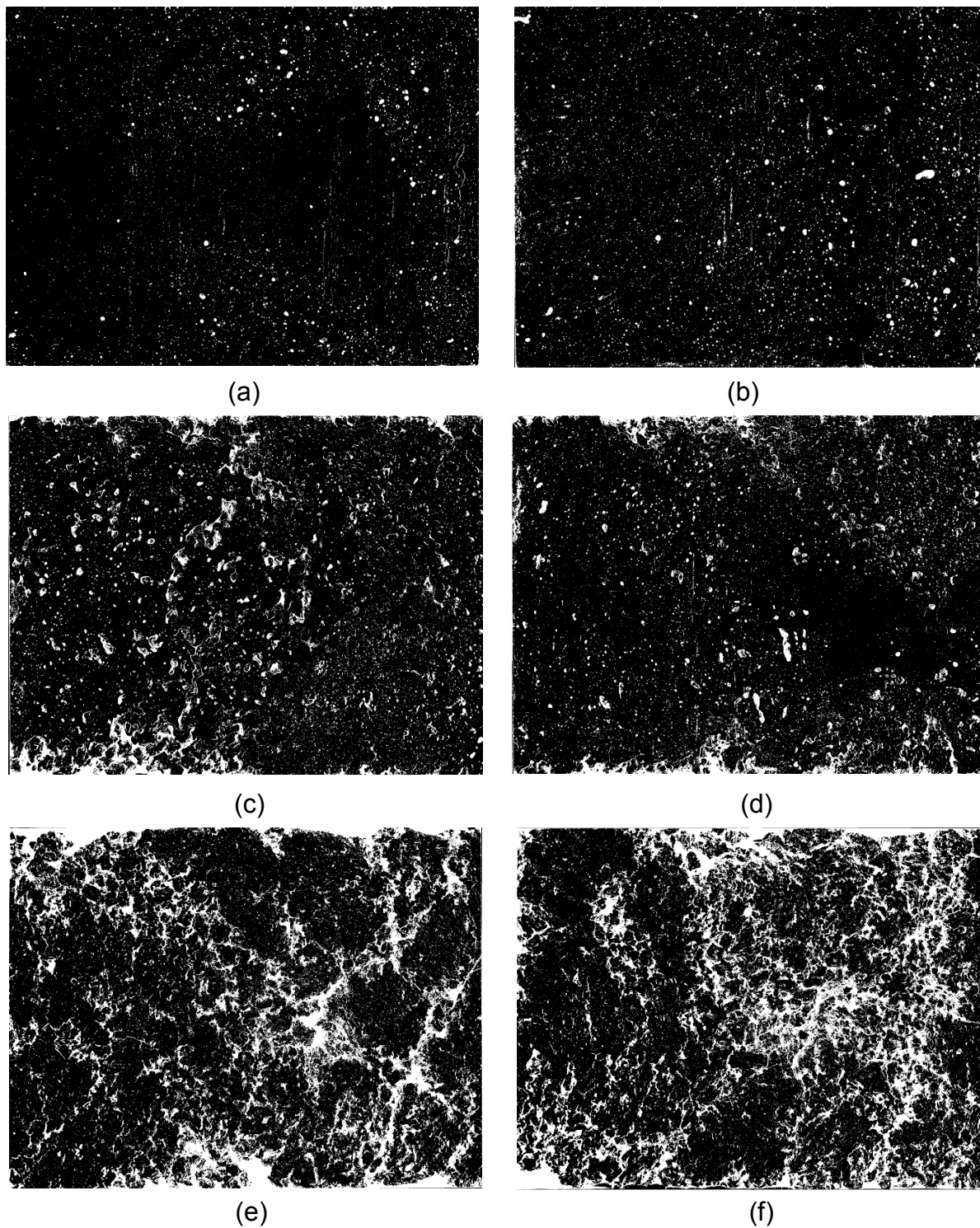
(e)



(f)

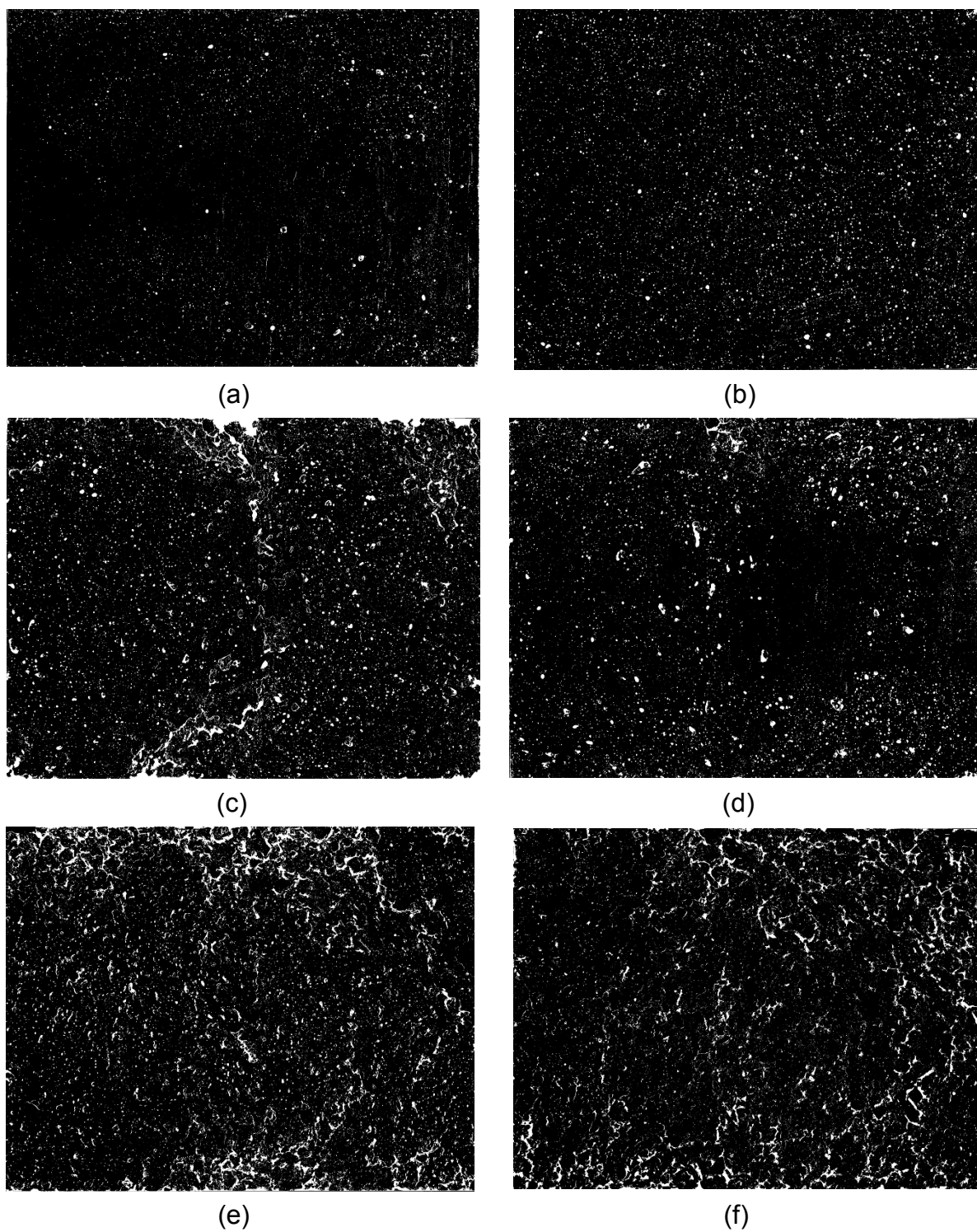
Escala: 1:5.

Figura 92 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-EMP-AGR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



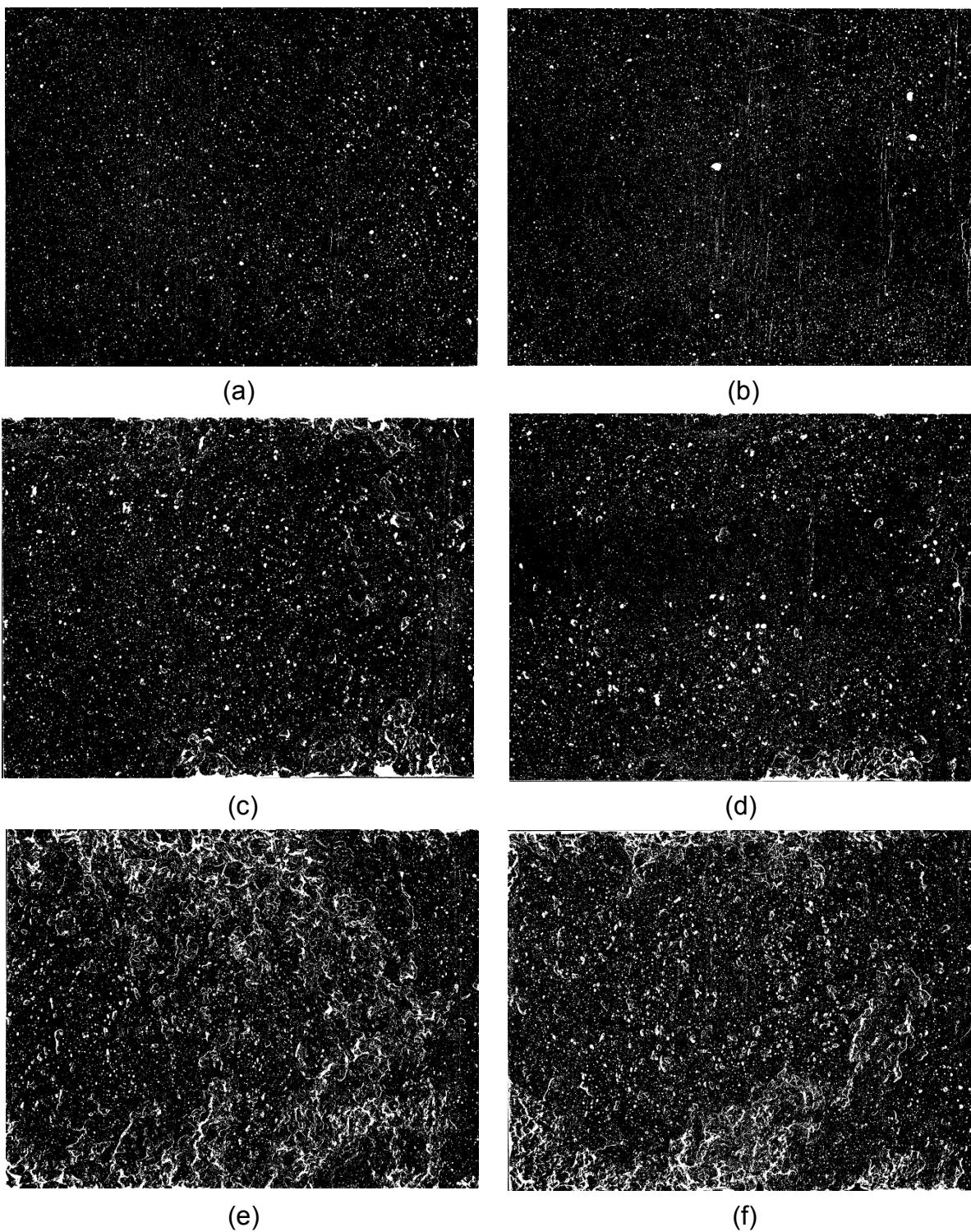
Escala: 1:5.

Figura 93 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-EMP-AMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



Escala: 1:5.

Figura 94 – Tratamento de imagem das placas de concreto CAA-EMP-AGMR: (a) e (b) aos 5 minutos; (c) e (d) aos 30 minutos; (e) e (f) aos 60 minutos.



Escala: 1:5.