

**Universidade Federal do Pará**



Thais Valadares Oliveira

**Formulações de Argamassas Autonivelantes  
para Contrapiso com Incorporação Parcial de  
Agregado Reciclado de Concreto**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia

Universidade Federal do Pará  
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia  
Pós-graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético



**Thais Valadares Oliveira**

**Formulações de Argamassas Autonivelantes para Contrapiso  
com Incorporação Parcial de Agregado Reciclado de Concreto**

**Dissertação de Mestrado**

**Orientadora: Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro**

**Janeiro de 2019**



**Thais Valadares Oliveira**

**Formulações de Argamassas Autonivelantes para Contrapiso  
com Incorporação Parcial de Agregado Reciclado de Concreto**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação  
em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.

Aprovado pela Comissão Examinadora.

*Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro.*

**Prof. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro**  
Orientadora – Universidade Federal do Pará

*Paulo Sérgio Lima Souza*

**Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza**

Examinador Interno – Universidade Federal do Pará

*Isaura Nazaré Lobato Paes*

**Prof. Dra. Isaura Nazaré Lobato Paes**

Examinadora Externa – Universidade Federal do Pará

*Angela Borges Masuero*

**Prof. Dra. Angela Borges Masuero**

Examinadora Externa – Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

Belém, 21 de janeiro de 2019.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Thais Valadares Oliveira.

TÍTULO: Formulações de Argamassas Autonivelantes para Contrapiso com Incorporação Parcial de Agregado Reciclado de Concreto.

GRAU: Mestre. ANO: 2019.

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

*Thais Valadares Oliveira*

**Thais Valadares Oliveira**

Rua A-4, Qd. 15, Lt. 28, Cidade Jardim.  
68.515-000 Parauapebas – PA – Brasil.

dos Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Central / UFPA, Belém – PA

---

### **Oliveira, Thais Valadares.**

Formulações de Argamassas Autonivelantes para Contrapiso com Incorporação Parcial de Agregado Reciclado de Concreto / Thais Valadares Oliveira; orientadora Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro. Tucuruí, 2019.  
84 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará.

1. Argamassas autonivelantes. 2. Agregados miúdos reciclados de concreto. 3. Aditivo polifuncional. 4. Ensaio de exsudação. I. Título.

CDD 624

*Dedico este trabalho aos meus pais, Silvestre e Adriana,  
pelo apoio incondicional, em todos os momentos.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, julgo essencial apresentar meus agradecimentos à Deus. Sem Ele nada do que conquistei até aqui seria possível, não haveria força para concluir este trabalho, nem teriam sido delineadas as melhores soluções nas mais diversas situações.

Agradeço aos meus pais, Adriana M. V. Oliveira e Silvestre M. de Oliveira, por muitas vezes terem confiado mais na minha capacidade do que eu mesma poderia. Obrigada pelo incentivo sempre e por todo o amor que vocês têm por mim. Eu os amo incondicionalmente! Pai, lhe agradeço também pelas diversas horas de laboratório que enfrentou comigo, eu não conseguiria vencer meu programa experimental no prazo sem isso.

À minha avó, Judith Martins, por cada oração em meu nome, desejando e rogando à Deus, de todo o coração, pelo meu sucesso acadêmico, profissional e pessoal. Amo a senhora, vó!

Murilo C. Costa, você merece um parágrafo inteiro, merece um livro de agradecimentos! Obrigada por todas as horas despendidas me auxiliando na realização dos experimentos, sem pedir nada em troca, apenas pela experiência e pela incrível boa vontade em ajudar um amigo. Como eu costumo lhe dizer: você é um anjo, merece muito!

À Luciana de N. P. Cordeiro, minha orientadora, pela sugestão deste tema, que muito me agradou; pelas dicas no decorrer deste trabalho; e, principalmente, pela paciência e compreensão. Obrigada por ter me auxiliado nas adaptações que se fizeram necessárias para que eu conseguisse conciliar trabalho, mestrado e especialização ao mesmo tempo.

Ana Carla C. Lopes, como lhe sou grata! Você viabilizou sobremaneira a realização deste trabalho. Obrigada por ter me auxiliado na trituração dos agregados, por todas as discussões sobre o tema, por cada dica certa que me deu para a realização dos experimentos. Você está se tornando perita em argamassas autonivelantes, parabéns pelo trabalho que tem desenvolvido!

Morgana, Marcus, Álvaro e Lucas de Jesus, obrigada pelo auxílio no laboratório, devo mais do que uma para vocês. Marcus, você sem dúvida se tornou, depois dessa experiência,

especialista na limpeza de moldes de corpo-de-prova, como você mesmo diz. Lucas, obrigada por todas as horas me ajudando nos ensaios, sendo que esta nem é sua engenharia preferida. Agradeço a paciência de vocês!

À professora Amanda Gil, e à toda a equipe da UNIUBE, pela disponibilização do laboratório para a execução de parte dos ensaios realizados com as argamassas formuladas.

À GCP Applied Technologies, e em especial à Mateus Guerra, pela presteza em fornecer os aditivos empregados na pesquisa, sem qualquer custo, bem como em sanar toda e qualquer dúvida que foi surgindo ao longo da realização da pesquisa.

À Marília Vieira, por sua amizade e companheirismo. Amiga, muito obrigada pela hospedagem todas as vezes que precisei ir à Belém, por me apresentar pessoas maravilhosas e, principalmente, por me fazer me sentir parte do seu mundo. Eu amo muito você!

Camila Simonetti e Glenda Costa, amigas muito queridas que mesmo à distância não deixaram de me apoiar nesse desafio. Meu sincero agradecimento! Rayssa Pageú e Amanda, amigas que me acompanham aqui, mais de perto, obrigada por terem se disponibilizado até mesmo a me ajudar por algumas horinhas no laboratório, vocês são um amor!

Ao meu chefe, Cleverland Carvalho, e ao meu coordenador, Daniel Benguigui, pela paciência e apoio! Obrigada por sempre terem cedido às minhas solicitações, sempre que a finalidade era acadêmica, o apoio de vocês foi vital para que eu pudesse concluir este trabalho.

Aos membros da banca, por terem tão prontamente aceitado avaliar este trabalho e por todas as contribuições oferecidas para a melhoria do mesmo.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), campus de Belém e de Tucuruí, e ao Centro Universitário de Parauapebas (CEUP), bem como à toda a sua equipe, pela disponibilização de seus laboratórios e pelo apoio no decorrer do desenvolvimento deste estudo.

## RESUMO

A argamassa autonivelante é um material dotado de características vantajosas para a indústria da construção civil, entre elas: elevada planicidade, reduzida espessura dos elementos que a utilizam, rápida aplicação e pequena demanda de mão-de-obra para sua execução. No intuito de agregar conhecimento acerca deste material, bem como de torná-lo mais sustentável, ao incorporar em sua mistura agregados reciclados de concreto, o presente trabalho foi proposto. O objetivo principal que o norteou foi constituir argamassas autonivelantes com incorporação destes resíduos e caracterizá-las no estado fresco, verificando a viabilidade técnica de seu uso. Além disso, em caráter complementar, observou-se como diferentes combinações de aditivos podem influenciar nas propriedades destas argamassas. Partindo da utilização de uma formulação base, disponível na literatura, foram então produzidos oito traços, tendo entre eles quatro variações de teores de substituição de areia comum por agregado miúdo reciclado de concreto (0%, 25%, 50% e 75%) e duas possíveis combinações de aditivos, uma que empregava paralelamente aditivo superplastificante e aditivo modificador de viscosidade e outra na qual foi aplicado apenas um aditivo plastificante polifuncional. Inicialmente, cada traço passou por ajustes individuais, de modo que apresentassem consistência, tempo de fluxo e configuração visual adequadas, sem demonstrar a ocorrência de exsudação ou segregação. A partir daí, foram feitos ensaios para verificar a exsudação, a densidade de massa, o teor de ar incorporado e o tempo de cura das argamassas. Ao final da pesquisa, notou-se que a incorporação de agregado reciclado em argamassas autonivelantes pode sim ser uma opção tecnicamente viável, sendo até mesmo vantajosa para as argamassas com ele formuladas, no que tange às propriedades avaliadas, ao reduzir, entre os traços com resíduo e os de referência, o teor de aditivo empregado (em até 0,2 %), a exsudação (a quantidade de água exsudada chegou a 2,04 % em um traço com agregado reciclado e a 2,61 % em um traço de referência), o teor de ar incorporado (variando de 0,17 % para 1,34 % entre traços com e sem agregado reciclado) e a densidade de massa (reduziu até 5,5 %). Entre as combinações de aditivos, por sua vez, observou-se que a mais satisfatória foi aquela que empregou aditivo polifuncional.

**Palavras-chave:** Argamassas autonivelantes; Agregados miúdos reciclados de concreto; Aditivo polifuncional; Ensaio de exsudação.



## ABSTRACT

Self-leveling mortar is a material with advantageous characteristics for the industry of civil construction, among them: high flatness, low thickness of the elements that use it, rapid application and short demand of labor for its execution. In order to add knowledge about this material, as well as to make it more sustainable, by incorporating recycled concrete aggregates in its mixture, the present work was proposed. The main objective was to build self-leveling mortars with incorporation of these residues and to characterize them in the fresh state, verifying the technical feasibility of their use. Furthermore, in a complementary manner, it was observed how different combinations of additives may influence the properties of these mortars. Based on the use of a base formulation, available in the literature, eight traces were produced, including four variations of replacement of common sand by recycled aggregate (0%, 25%, 50% and 75%) and two possible combinations of additives, one employing in parallel a superplasticizer additive and a viscosity modifying additive and another in which only one polyfunctional plasticizer additive was applied. Initially, each mixture passed through individual adjustments so as to have adequate consistency, flow time and visual configuration, without demonstrating the occurrence of exudation or segregation. Thereafter, fresh tests were carried out to verify exudation, mass density, incorporated air content and curing time of the mortars. At the end of the research, it was noticed that the incorporation of recycled aggregate in self-leveling mortars could be a technically feasible option, and even advantageous for the mortars formulated with it, considering the evaluated properties, by reducing, among the mixtures with the residue and those ones of reference, the amount of additive employed (up to 0.2%), the exudation (the quantity of water exuded reached 2.04% in a mixture with recycled aggregate and 2.61% in a mixture of reference), the incorporated air content (ranging from 0.17% to 1.34% between traces with and without recycled aggregate) and the mass density (reduced up to 5.5%). Among the combinations of additives, in turn, it was observed that the most satisfactory was the one that employed polyfunctional additive.

**Keywords:** Self-leveling mortars; Fine recycled concrete aggregates; Polyfunctional additive; Exudation test.

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introdução</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Justificativa   | 3         |
| 1.2. Objetivos   | 5         |
| 1.2.1. Objetivo geral  | 5         |
| 1.2.2. Objetivos específicos   | 5         |
| 1.3. Questão de pesquisa   | 6         |
| 1.4. Hipótese  | 6         |
| 1.5. Estrutura da pesquisa   | 6         |
| <br>   |           |
| <b>2. Revisão Bibliográfica</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1. Argamassas autonivelantes   | 7         |
| 2.1.1. Vantagens e desvantagens do material                                  | 8         |
| 2.1.2. Propriedades essenciais   | 11        |
| 2.1.3. Prescrições normativas aplicáveis ao uso de argamassas autonivelantes | 14        |
| 2.2. Agregados reciclados  | 15        |
| 2.2.1. Resíduos de concreto  | 16        |
| 2.2.2. Prescrições normativas aplicáveis ao uso de agregados reciclados      | 18        |
| 2.3. Aplicação de aditivos químicos e adições minerais                       | 19        |
| <br>   |           |
| <b>3. Programa Experimental</b>  | <b>21</b> |
| 3.1. Parâmetros fixos e variáveis da pesquisa                                | 21        |
| 3.2. Materiais utilizados  | 23        |
| 3.2.1. Cimento   | 23        |
| 3.2.2. Sílica ativa  | 25        |
| 3.2.3. Agregados miúdos  | 27        |
| 3.2.4. Aditivos  | 31        |
| 3.2.5. Água de amassamento   | 32        |
| 3.3. Métodos de ensaio   | 32        |
| 3.3.1. Estudo de dosagem piloto  | 33        |
| 3.3.2. Ajuste das formulações – Ensaio de consistência e de tempo de fluxo   | 36        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3.3. Avaliação do efeito da incorporação de AMRC nas propriedades das argamassas autonivelantes no estado fresco | 38        |
| 3.3.3.1. Ensaio de exsudação   | 38        |
| 3.3.3.2. Determinação do tempo de cura   | 40        |
| 3.3.3.3. Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado  | 41        |
| <b>4. Resultados e discussão</b>   | <b>42</b> |
| 4.1. Formulações de argamassas autonivelantes produzidas   | 42        |
| 4.2. Avaliação do efeito da incorporação de AMRC nas propriedades das argamassas autonivelantes no estado fresco   | 47        |
| <b>5. Considerações finais</b>   | <b>56</b> |
| 5.1. Conclusões  | 56        |
| 5.2. Sugestões para trabalhos futuros  | 58        |
| <b>Referências bibliográficas</b>  | <b>59</b> |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Traços propostos na presente pesquisa e suas respectivas descrições.  | 22 |
| Tabela 3.2 – Ensaio físico do cimento utilizado.   | 24 |
| Tabela 3.3 – Análise química do cimento empregado na pesquisa.   | 24 |
| Tabela 3.4 – Características físicas do AMN.   | 28 |
| Tabela 3.5 – Características físicas do AMRC.  | 29 |
| Tabela 3.6 – Caracterização dos agregados miúdos, natural e reciclado.   | 30 |
| Tabela 3.7 – Traço unitário, em massa, proposto por Souza et al. (2012) e utilizado como traço base da presente pesquisa.                  | 34 |
| Tabela 4.1 – Descrição dos traços unitários finais das argamassas formuladas.  | 42 |
| Tabela 4.2 – Espalhamento médio (Em), tempo de fluxo e configuração visual obtidos para as argamassas produzidas após o ajuste dos traços. | 43 |
| Tabela 4.3 – Dados resultantes do ensaio de exsudação.   | 48 |
| Tabela 4.4 – Tempo de cura das argamassas formuladas.  | 51 |
| Tabela 4.5 – Resumo dos resultados obtidos na pesquisa.  | 55 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Configuração de uma argamassa autonivelante com segregação.   | 11 |
| Figura 2.2 – Configuração de uma argamassa autonivelante com exsudação.  | 12 |
| Figura 2.3 – Esquema ilustrando borda da argamassa autonivelante pós-espalhamento.                                       | 12 |
| Figura 2.4 – Características visuais de argamassas autonivelantes pós-espalhamento.                                      | 12 |
| Figura 2.5 – Formação dos agregados reciclados de concreto.  | 16 |
| Figura 2.6 – Microscopias com aproximação de 33.000x.  | 18 |
| Figura 3.1 – Procedimentos adotados para a realização da pesquisa.   | 22 |
| Figura 3.2 – Distribuição granulométrica do cimento.   | 25 |
| Figura 3.3 – Difratoograma da sílica ativa utilizada na pesquisa.  | 26 |
| Figura 3.4 – Distribuição granulométrica da sílica ativa.  | 27 |
| Figura 3.5 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos.  | 29 |
| Figura 3.6 – Imagens de microscópio digital do AMN e do AMRC.  | 31 |
| Figura 3.7 – Procedimento de mistura adotado para a preparação das argamassas com AMN e sem AMRC.                        | 33 |
| Figura 3.8 – Equipamentos empregados nos ensaios de consistência e de tempo de fluxo e suas respectivas dimensões.       | 37 |
| Figura 3.9 – Momento dos ensaios com mini-slump e com mini funil-V.  | 37 |
| Figura 3.10 – Ensaio de exsudação da argamassa formulada.  | 39 |
| Figura 3.11 – Ensaio de tempo de cura.   | 41 |
| Figura 4.1 – Teor de aditivo final empregado em cada uma das formulações propostas.                                      | 46 |
| Figura 4.2 – Massa acumulada de água exsudada ao longo dos 90 minutos de ensaio, para os traços com aditivos combinados. | 47 |
| Figura 4.3 – Massa acumulada de água exsudada ao longo dos 90 minutos de ensaio, para os traços com aditivo específico.  | 47 |
| Figura 4.4 – Quantidade de água exsudada para cada traço ensaiado.   | 49 |
| Figura 4.5 – Tempos de cura e teores finais de aditivo SP obtidos para cada traço.                                       | 52 |
| Figura 4.6 – Tempos de cura e teores finais de aditivo PP obtidos para cada traço.                                       | 52 |
| Figura 4.7 – Densidade de massa dos traços formulados, no estado fresco.   | 53 |
| Figura 4.8 – Teor de ar incorporado das argamassas produzidas.   | 54 |

## LISTA DE SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AENOR – Associação Espanhola de Normalização e Certificação
- AI – Ar Incorporado
- AMN – Agregado Miúdo Natural
- AMRC – Agregado Miúdo Reciclado de Concreto
- ARC – Agregado de Resíduo de Concreto
- ARI – Alta Resistência Inicial
- ARM – Agregado de Resíduo Misto
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- CEUP – Centro Universitário de Parauapebas
- DMC – Dimensão Máxima Característica
- EFNARC – European Federation for Specialist Const. Chemicals and Concrete Systems
- LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos
- MF – Módulo de Finura
- MV – (Aditivo) Modificador de Viscosidade
- PP – (Aditivo) Plastificante Polifuncional
- RCC – Resíduos de Construção Civil
- SP – (Aditivo) Superplastificante
- UFPA – Universidade Federal do Pará
- UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

# 1. INTRODUÇÃO

A argamassa autonivelante é um produto que pode proporcionar a constituição de revestimentos com satisfatória planicidade e qualidade, cuja tecnologia construtiva é normalmente considerada vantajosa, ao passo que permite otimizar uma obra, reduzindo seus prazos e ampliando sua produtividade. Tem seu uso atrelado à construção de pisos e contrapisos, devido principalmente à sua capacidade de nivelar-se sob simples ação da gravidade. A UNE-EN 13.318 (AENOR, 2001) relata que argamassas autonivelantes são argamassas especiais, as quais podem substituir as tradicionais na construção de pisos, uma vez que possuem interessantes características vinculadas à sua utilização, como a homogeneidade e a facilidade e rapidez de aplicação.

A referida argamassa foi desenvolvida na Europa, por volta da década de 1980, e começou a ser utilizada no Brasil já na década de 1990 (CICHINELLI, 2012). Seu uso ainda é pouco disseminado no país devido, entre outros fatores, ao reduzido conhecimento da tecnologia. Segundo Martins (2009), as pesquisas com argamassas autonivelantes tiveram início em Valência, cidade espanhola, a qual, anos mais tarde, recebeu em suas empresas representantes de indústrias brasileiras que visavam trazer para o Brasil formulações e equipamentos que viabilizassem a produção da argamassa no país, com os materiais aqui disponíveis.

Considerando que a argamassa em estudo também possui como premissa evitar a necessidade de adensamento manual ou mecânico, ela é, além de autonivelante, uma argamassa autoadensável. No entanto, como citado por Martins (2009), trata-se de um material autoadensável dotado de uma característica extra específica: a superfície lisa e regular, com desníveis limitados a 1 mm a cada 4 m de comprimento do elemento estrutural.

Testes em obra com a aplicação da argamassa autonivelante, como os realizados por Branco e Brito (2014), demonstram a capacidade deste material de reduzir o tempo previsto para a execução de um contrapiso em até, aproximadamente, 47 %, isto porque utilizar esta argamassa é mais rápido do que executar um piso em argamassa convencional, visto que ela não precisa ser manualmente nivelada. Ademais, estes autores notaram por meio do uso do material a possibilidade de reduzir a equipe de trabalho e de ganhar em produtividade; a ausência de necessidade de transporte vertical dos materiais para a produção da argamassa em uma edificação de múltiplos pavimentos, uma vez que utiliza-se o

bombeamento da mesma; o beneficiamento do planejamento físico da obra (um menor tempo nesta etapa permite acelerar atividades sucessoras); entre outras vantagens.

Ainda que algumas formulações de argamassas autonivelantes, dependendo de sua complexidade, impliquem em elevados custos, é fato que a utilização deste material pode promover uma economia considerável para a obra. Uma vez que a demanda por mão de obra para a sua aplicação é reduzida, bem como a exigência de capacitação técnica ou do emprego de esforços físicos pela mesma, o que é vantajoso para as construtoras. Além disso, o processo de disposição do referido material, como citado, é simplificado (SILVA, 2016).

O uso deste tipo de argamassa possibilita também a execução de camadas de piso e/ou contrapiso de reduzida espessura, da ordem de 5 a 10 mm, auxiliando na diminuição do peso de uma estrutura. Entretanto, esta mesma característica é capaz de gerar inconvenientes que devem ser cuidadosamente evitados quando da utilização do material, como a ocorrência de retração por secagem, a redução do conforto acústico e térmico do ambiente em que é aplicado e o rápido endurecimento. Estas situações podem comprometer a qualidade final do produto, bem como sua trabalhabilidade no estado fresco.

Neste trabalho, o estudo da argamassa autonivelante esteve especialmente pautado na proposição da aplicação de um componente diferenciado em sua mistura, em questão o Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC). Ao sugerir o emprego de agregados reciclados, em especial de Resíduos da Construção Civil (RCC), tem-se o intuito, atualmente em foco, de apelar diversos problemas ambientais, ao incentivar a redução da extração de matérias primas que, inevitavelmente, conduzem a gradativa deterioração da natureza.

Com a utilização de RCC, é possível minimizar as extrações em detrimento da aplicação de agregados provenientes da reciclagem de resíduos da indústria da construção civil, permitindo que estes materiais retornem ao ciclo produtivo. No entanto, para o uso consciente do agregado reciclado é certamente imprescindível avaliar a viabilidade técnica de seu emprego para a substituição parcial ou total de agregados naturais e artificiais, comuns na indústria.

Como descrito por Mehta e Monteiro (2014), o uso de entulho de construção como agregado para concretos e argamassas tem seu grande obstáculo em custos de britagem, graduação, controle do pó e separação de constituintes indesejáveis. Apesar disso, ele pode vir a ser um tipo de agregado economicamente viável, dependendo da fonte deste material (demolição de estruturas massivas ou pavimentos de concreto, por exemplo) e do local em que será utilizado, especialmente se neste houver escassez de agregados de qualidade e o custo de disposição de entulhos for elevado, tornando mais proveitoso reciclar-lo.



A indústria da construção civil produz, constantemente e de forma massiva, diversos resíduos reutilizáveis, entre eles principalmente aqueles constituídos por materiais cerâmicos ou cimentícios. O resíduo de concreto, empregado na presente pesquisa, devido ao seu menor grau de contaminação por outros materiais e a características básicas suas, como a resistência, é o resíduo que, dentre os provenientes desta indústria, apresenta o maior potencial de reutilização (GONÇALVES, 2001).

Além disso, outros resíduos de construção podem ser prejudiciais a misturas cimentícias, por exemplo: vidros podem afetar sua durabilidade, devido ao seu elevado teor de sílica; metais podem reagir com soluções alcalinas e causar exageradas expansões; e papéis e resíduos orgânicos, incinerados ou não, podem dificultar a pega e o endurecimento de argamassas e concretos. Não sendo estes materiais, portanto, adequados para a produção de agregados (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Tendo em vista a importância de verificar a viabilidade da incorporação de agregados reciclados em certos materiais, bem como de disseminar o conhecimento a respeito das argamassas autonivelantes e de seus benefícios para a construção civil, principalmente em nível nacional, foi proposto por meio desta pesquisa a avaliação do uso de resíduos de construção civil, especialmente de resíduos de concreto, enquanto agregados miúdos na composição de argamassas autonivelantes, observando os efeitos da inclusão destes materiais sobre suas propriedades no estado fresco.

Em caráter complementar, foram também investigados no presente trabalho os efeitos de duas combinações distintas de aditivos sobre as formulações de argamassas autonivelantes propostas. Fez-se isto no intuito de observar aquela que melhor se adequaria à cada mistura, implementando sua estabilidade e fluidez e impedindo que a mesma segregasse e/ou exsudasse. Sabe-se que, como citado por Fiorentin (2011), é o adequado emprego de aditivos que torna argamassas autoadensáveis materiais diferenciados, visto que são eles que as conduzem a propriedades incomuns para argamassas convencionais.

## **1.1. Justificativa**

Ao considerar todos os benefícios permitidos pelo uso de argamassas autonivelantes, alguns deles citados anteriormente, bem como sua expressiva tendência à contínua implementação na indústria e no mercado brasileiro de construção civil, conforme previsto por Rubin (2015), é essencial entender as propriedades e o desempenho deste

material, tão empregado em outros países e ainda pouco pesquisado, especialmente em âmbito nacional. Portanto, desenvolver e incentivar pesquisas acerca de argamassas autonivelantes ajuda a preencher lacunas no conhecimento ainda relativamente restrito no que tange a aplicação desta tecnologia, beneficiando tanto à comunidade acadêmica quanto à indústria.

Internacionalmente, diversas são as publicações disponíveis na literatura acerca do estudo destas argamassas, conduzidas através das mais diversas perspectivas. Alguns trabalhos recentes são os de Jawahar et al. (2013), que buscaram a otimização dos teores de aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade em argamassas autonivelantes; de Yang et al. (2016), que aplicaram fosfogesso, advindo da indústria de fertilizantes, enquanto material disponível para a mistura de argamassas deste tipo; de Canbaz et al. (2016), que verificaram os efeitos de diferentes teores de aditivos e tipos de agregados sobre as propriedades de pisos autonivelantes; e de Zhi et al. (2017), que avaliaram os efeitos de três aditivos químicos em propriedades destas argamassas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, sendo elas à base de gesso, não de cimento.

No país, o trabalho pioneiro a respeito das argamassas autonivelantes, suas propriedades e instalação, foi o de Nakakura e Bucher (1997). O de Martins (2009) foi desenvolvido anos mais tarde, objetivando estabelecer procedimentos adequados para a dosagem de pastas para argamassas autonivelantes. Na sequência, foram sendo preparados alguns outros estudos, como os de Souza et al. (2012), de Souza (2013), de Rubin (2015) e o de Silva (2016), tratando do desempenho do material, bem como de sua comparação com outras argamassas, como a tradicional e a industrializada.

Além da importância do estudo deste tipo de argamassa propriamente dito, é relevante citar a composição para ele proposta, com o emprego de materiais reciclados, resíduos da própria indústria da construção civil. Logo, a pesquisa se ampara ainda na proposição da formulação de uma argamassa composta por materiais sustentáveis, reduzindo, assim, o uso de matérias-primas e, conseqüentemente, a extração destas da natureza. A ideia é, ao invés de extrair, incorporar resíduos de concreto neste material, os quais são normalmente descartados, caso para eles não seja definida nova finalidade.

Muitos são os trabalhos atualmente pautados no estudo da aplicação de Resíduos da Construção Civil (RCC), em especial de resíduos de concreto, em novos concretos, como agregados. Como é o caso, por exemplo, das pesquisas internacionais de Zega e Maio (2011), de Ledesma et al. (2014), de Zhao et al. (2015), de Martínez et al. (2016), de Silva et al.

(2016), de Kapoor et al. (2016), de Fan et al. (2016) e de Kumar et al. (2017); e das nacionais de Gonçalves (2001), de Miranda (2005) e de Cordeiro (2013).

No entanto, poucos são aqueles destinados à análise de sua incorporação em argamassas, como o de Machado et al. (2018), por exemplo, e principalmente de sua aplicação em argamassas autonivelantes, como proposto no presente trabalho, bem como na pesquisa de Lorenzet e Gomes (2012) e na de Carvalho (2015), sendo que este último empregou o resíduo em substituição ao cimento Portland, não como agregado. Assim, foi também o interesse de testar um tipo de argamassa de uso relativamente reduzido no país, com a incorporação de um resíduo para ele pouco avaliado, que motivou este trabalho.

## **1.2. Objetivos**

São objetivos geral e específicos da presente pesquisa, norteando o encaminhamento de seus resultados e conclusões, os listados na sequência.

### **1.2.1. Objetivo geral**

Constituir formulações de argamassas autonivelantes com incorporação de Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC), em diferentes teores, e caracterizá-las no estado fresco, de modo a observar os efeitos do uso deste resíduo no referido material.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Podem ser citados enquanto objetivos específicos desta pesquisa:

- avaliar o efeito do teor de incorporação de resíduo de concreto na constituição de formulações de argamassas autonivelantes, realizando os ajustes necessários;
- verificar, no estado fresco, a influência de diferentes teores de incorporação de agregado reciclado de concreto sobre a consistência, o tempo de fluxo, a taxa de exsudação, o tempo de cura, a densidade de massa e o teor de ar incorporado das argamassas formuladas;
- verificar como as diferentes combinações de aditivos utilizadas nas formulações propostas influenciaram em suas propriedades no estado fresco.

### **1.3. Questão de pesquisa**

A principal questão que motivou esta pesquisa foi a seguinte: É possível formular argamassas autonivelantes com incorporação parcial de Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC) que apresentem, no estado fresco, características tecnicamente satisfatórias, semelhantes às de argamassas autonivelantes sem este resíduo?

### **1.4. Hipótese**

A presente pesquisa tem por hipótese que a incorporação parcial de Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC) à composição de argamassas autonivelantes mantendo para elas propriedades satisfatórias, semelhantes às de argamassas autonivelantes sem este resíduo, é possível, desde que as formulações adotadas sejam devidamente ajustadas durante a produção do material, especialmente no que se refere aos teores de aditivos empregados.

### **1.5. Estrutura da pesquisa**

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. O primeiro contempla uma breve introdução, contendo conceitos relacionados à temática escolhida, a justificativa da pesquisa, seus objetivos, a questão que a norteia e a hipótese nela a priori defendida. O segundo, por sua vez, apresenta a revisão bibliográfica, tratando de definições intrínsecas ao estudo de argamassas autonivelantes e de agregados reciclados, bem como à aplicação de aditivos e adições. Na sequência destes, o terceiro traz consigo a descrição do programa experimental da pesquisa, citando e caracterizando os materiais utilizados e detalhando os métodos de ensaio empregados para a avaliação das argamassas formuladas. O quarto capítulo, referente à apresentação dos resultados e discussão do trabalho, relaciona gráficos e tabelas que demonstram os produtos obtidos com a realização do estudo. As considerações finais da pesquisa, contendo suas conclusões e propostas para trabalhos futuros, estão dispostas no capítulo cinco. O sexto e último capítulo, não numerado, apresenta as referências bibliográficas que possibilitaram a fundamentação teórica do estudo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

São definições importantes para a melhor compreensão do objeto desta pesquisa aquelas brevemente apresentadas nos três subcapítulos que seguem, a respeito, respectivamente: das argamassas autonivelantes, dos agregados reciclados e da aplicação de aditivos químicos e adições minerais.

### **2.1. Argamassas autonivelantes**

Argamassas autonivelantes são argamassas dotadas de características específicas, como baixa viscosidade, elevada fluidez e capacidade de se nivelar apenas com o auxílio de seu próprio peso. São interessantes vantagens atreladas ao seu uso a rápida aplicação deste material e a reduzida quantidade de mão de obra demandada para tanto, fatores que ajudam a minimizar os custos envolvidos em sua utilização (ARAÚJO et al., 2015). Como citado por Onishi e Bier (2010), é desejável que a argamassa autonivelante seja um material de alto desempenho, com trabalhabilidade satisfatória, rápida secagem e endurecimento, retração moderada e suavidade superficial.

Segundo Binggeli e Greichen (2010), existem dois tipos de argamassas autonivelantes: uma de base cimentícia e outra à base de gesso. Na presente pesquisa, é analisada aquela de base cimentícia. Nakakura e Bucher (1997), pioneiros no estudo deste material no Brasil, relatam que, assim como argamassas tradicionais, as argamassas autonivelantes são formulações constituídas primordialmente por cimento Portland, preferencialmente de Alta Resistência Inicial (ARI), compondo de 25 a 45% da massa total; e areia fina quartzosa (de 40 a 60%). O restante da massa deste material (de 10 a 15%) é formado por adições minerais e aditivos químicos, que entram para a composição da mistura com o intuito de modificar características reológicas das argamassas no estado fresco. Dependendo de sua destinação, para acabamento ou regularização, a água de amassamento da argamassa autonivelante constituirá de 20 a 30% de sua massa seca total.

Conforme Aitcin (2000), a referida argamassa não exige para sua composição materiais especiais ou incomuns, mas é sobremaneira importante que estes sejam devidamente selecionados, observando se possuem algumas propriedades específicas necessárias. O cimento a ser utilizado nela, por exemplo, deve se destacar em sua finura e na capacidade de adsorção junto ao aditivo superplastificante. Já sobre o agregado

empregado na mistura, Carvalho (2015) relata que deve haver um grande cuidado durante a escolha de sua granulometria, visto que quanto menor o tamanho máximo do mesmo, mais reduzido será o risco de segregação da argamassa.

Felekoglu et al. (2006), de modo semelhante a Aitcin (2000), citaram que o cimento, as adições, pozolânicas ou inertes, e os aditivos químicos utilizados em argamassas autonivelantes devem ser cuidadosamente escolhidos, de modo a obter uma composição adequada para a pasta, capaz de enriquecer o esqueleto granular da mistura. Eles relatam em sua pesquisa que tanto as propriedades físicas do cimento e das adições, como o formato, a morfologia da superfície, a finura, a distribuição do tamanho das partículas e a capacidade de empacotamento, quanto as interações físico-químicas deles com os aditivos deve sempre ser levada em consideração, uma vez que estes parâmetros podem influenciar de diferentes maneiras no comportamento da argamassa produzida, especialmente no estado fresco.

No que se refere à composição das argamassas formuladas nesta pesquisa, especificamente, foram avaliados os efeitos da incorporação de agregados reciclados de concreto neste material, em substituição parcial a areia (agregado miúdo comumente empregado), e também da mudança da combinação de aditivos nas misturas produzidas.

### **2.1.1. Vantagens e desvantagens do material**

Martins (2009) cita que a argamassa autonivelante, em função de sua elevada fluidez e da capacidade que possui de se espalhar apenas pela ação de seu próprio peso, permite um preenchimento mais uniforme e homogêneo da área em que é aplicada, se comparada a uma argamassa convencional. Também por este motivo, Rubin (2015) relata que o emprego deste material possibilita um melhor acabamento do piso e / ou do contrapiso, sem os recorrentes defeitos relacionados a falhas de execução.

Enquanto o sistema tradicional de argamassas, especialmente aquele empregado para pisos, apresenta desvantagens como a elevada espessura, o grande peso próprio, o baixo rendimento de instalação (5 a 10 m<sup>2</sup>/h por homem) e a representativa recorrência de manifestações patológicas (fissurações, ondulações, desníveis, entre outras); a argamassa autonivelante permite a execução de uma fina espessura (5 a 10 mm), com tendência à fissuração reduzida pelo uso controlado de aditivos químicos e fibras (quando presentes) e uma grande horizontalidade superficial, além de uma operação acelerada a um ritmo de 50 a 100 m<sup>2</sup>/h por homem (NAKAKURA e BUCHER, 1997).

Considerando que a argamassa autonivelante, quando aplicada em obra, é normalmente bombeada, é também uma vantagem atrelada ao seu uso a redução de prazos de execução, visto que a velocidade de bombeamento aumenta a produtividade na construção, ao passo que dispensa o uso de equipamentos tradicionais para o transporte do material (SILVA, 2013). Além disso, Egle (2010) cita que o uso desta argamassa permite a realização de construções mais limpas e organizadas, pois ao utilizar o bombeamento libera-se espaço do pavimento para a disposição de outros produtos de utilização corrente na obra.

Este tipo de argamassa pode ter diversas aplicações. Nakakura e Bucher (1997) o conceituaram enquanto um material de construção versátil, passível de utilização em variados ambientes. Martins (2012) cita que a argamassa autonivelante pode ser empregada tanto como camada de regularização (contrapiso) quanto como camada de acabamento, sendo que neste último caso ela tem a possibilidade de ser misturada com resinas e corantes, de modo a realçar seu aspecto visual. Além disso, Felekoglu et al. (2006) relatam que este material pode ser também considerado vantajoso em obras de reparo, tendo em conta sua facilidade de aplicação e suas propriedades mecânicas.

Neste trabalho, as formulações de argamassa autonivelante com incorporação parcial de agregado reciclado tiveram por intuito a aplicação em contrapiso. Segundo Egle (2010), quando se faz uso de um contrapiso autonivelante, além de ter a vantagem de lidar com características específicas do material, como sua fluidez, resistência mecânica, durabilidade e espessura, tem-se o benefício de poder utilizá-lo como base para o assentamento de diversos revestimentos, como piso cerâmico, carpete, tábua corrida, porcelanato, mármore e outros, sem gerar prejuízos ao acabamento destes.

Outro interessante ganho possibilitado pela aplicação dessas argamassas é a redução do pé direito de um patamar, bem como do peso final de um sistema de piso, devido às pequenas espessuras com que suas camadas podem ser executadas. Estas reduções permitem até mesmo que economias sejam feitas nos gastos com a estrutura da edificação (EGLE, 2010; RUBIN, 2015).

Normalmente, a argamassa autonivelante possui uma resistência satisfatória à entrada de agentes agressivos, além de permitir uma fácil limpeza, quando empregada enquanto piso final, em função de sua baixa porosidade. Esta característica da mesma é conferida pela composição granulométrica de seus constituintes, em geral mais fina que a dos componentes de uma argamassa convencional (MARTINS, 2012).

Yang et al. (2016) cita que a boa durabilidade, a elevada planicidade superficial, a reduzida tendência à fissuração (dependendo de sua composição) e o rápido ganho de

resistência mecânica, tornam esta argamassa adequada para a aplicação em diversos locais, como escolas, hospitais, estacionamentos, apartamentos, escritórios e etc.

Como qualquer outro material, no entanto, a argamassa autonivelante também possui suas desvantagens, que devem ser igualmente frisadas para que se tenha um conhecimento global acerca da mesma. A princípio, vale observar que, como citado por Souza (2013), tratando-se de um produto que se autonivela, não é possível empregá-lo em locais que necessitem da realização de um caimento, como é o caso das áreas molhadas em geral (banheiros, áreas de serviço e cozinhas, por exemplo). Além disso, Silva (2016) relata que este material possui um tempo de pega acelerado, endurecendo rapidamente, o que pode comprometer sua trabalhabilidade e bombeamento.

Branco e Brito (2014), por sua vez, descrevem a reduzida quantidade de empresas no país com conhecimento e domínio suficientes para a produção e aplicação deste material em suas obras atualmente. Visto que, para a sua preparação, seja em obra ou em centrais, deve-se ter um grande cuidado com a quantidade de água colocada na mistura, bem como com a dosagem de aditivos, de modo a evitar sérios problemas durante a execução do piso ou do contrapiso, como por exemplo: o entupimento de mangotes durante o bombeamento, a segregação do material e o retardo do tempo de cura e enrijecimento da argamassa, inviabilizando a rápida liberação da área.

Rubin (2015) cita que um fator que desmotiva o uso deste produto no Brasil é a falta de especificações técnicas para a utilização e produção do material, bem como de equipamentos padronizados para a sua aplicação, o que acaba por gerar muitas dúvidas no que se refere ao adequado comportamento da argamassa autonivelante.

Por fim, é importante ressaltar que esta argamassa, devido à espessura reduzida de suas camadas, pode afetar o conforto acústico e térmico de uma edificação, além de conduzir a expressivas ocorrências de retração por secagem. No entanto, quanto à questão termo-acústica, atualmente já existem casos de aplicação deste material sobre mantas acústicas e térmicas, de modo a combater este problema; e, no que se refere a retração por secagem da argamassa, vários estudos já têm sido pautados na análise de formas de reduzir seus efeitos, como é o caso dos trabalhos de Silva (2016) e de Carvalho (2015), que empregaram fibras e adições minerais com este propósito.



### 2.1.2. Propriedades essenciais

Motzet (2007) lista, em ordem de importância, propriedades que uma argamassa autonivelante bem dosada deve apresentar, sendo elas: auto adensamento, baixa viscosidade, pronto assentamento, rápido endurecimento, acelerado ganho de resistência, rápida secagem, estabilidade dimensional, durabilidade, resistência superficial e forte aderência ao substrato. Nota-se, por meio desta listagem, que as propriedades mais desejadas deste material estão atreladas às suas condições no estado fresco.

São as propriedades que as argamassas autonivelantes demonstram neste estado que a diferenciam das argamassas convencionais. Entre elas estão o auto adensamento, verificado por meio de ensaios de consistência que permitem avaliar as características reológicas do material; e a estabilidade ou, de maneira mais clara, sua capacidade de resistir à segregação e à exsudação. Esta última propriedade é normalmente notada qualitativamente, por simples observação da argamassa após despejada sobre uma superfície plana.

Silva (2016) apresentou em seu trabalho algumas imagens ilustrando a configuração de uma argamassa autonivelante mal dosada, com peculiaridades próprias de uma mistura com segregação e com exsudação, conforme demonstram as Figuras 2.1 e 2.2, respectivamente. Felizmente, nenhuma das argamassas formuladas nesta pesquisa se apresentou nas referidas condições, provavelmente por partirem do emprego de uma dosagem pré-existente, proposta por Souza et al. (2012), como melhor descrito no capítulo referente ao Programa Experimental.

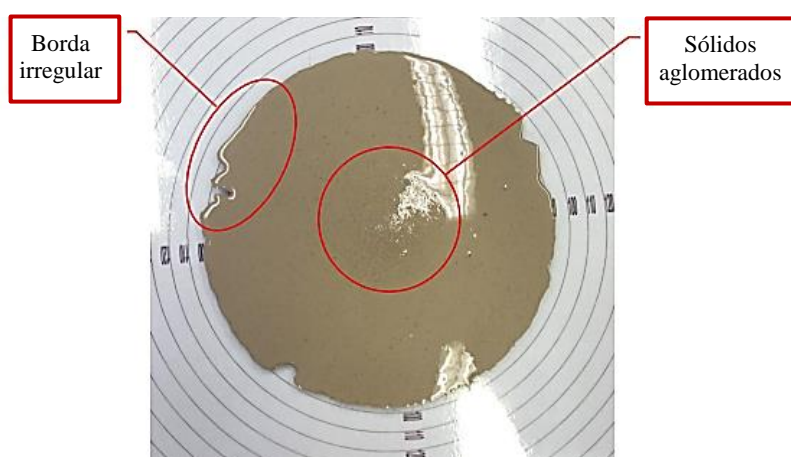


Figura 2.1 – Configuração de uma argamassa autonivelante com segregação (SILVA, 2016).

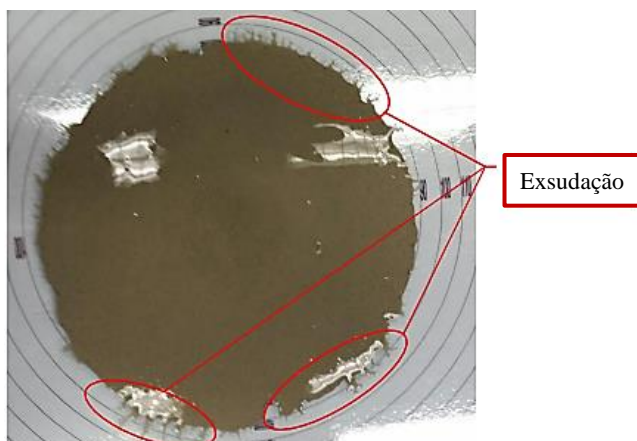


Figura 2.2 – Configuração de uma argamassa autonivelante com exsudação (SILVA, 2016).

Martins (2009) também elaborou e apresentou em seu trabalho esquemas enfatizando características desejáveis e indesejáveis para formulações de argamassas autonivelantes, após seu espalhamento, no que tange à estabilidade da mistura. Na Figura 2.3 são ilustradas configurações de borda, que ajudam a notar a ocorrência de exsudação. Na Figura 2.4, por sua vez, são citadas e demonstradas peculiaridades intrínsecas de pastas com e sem segregação.

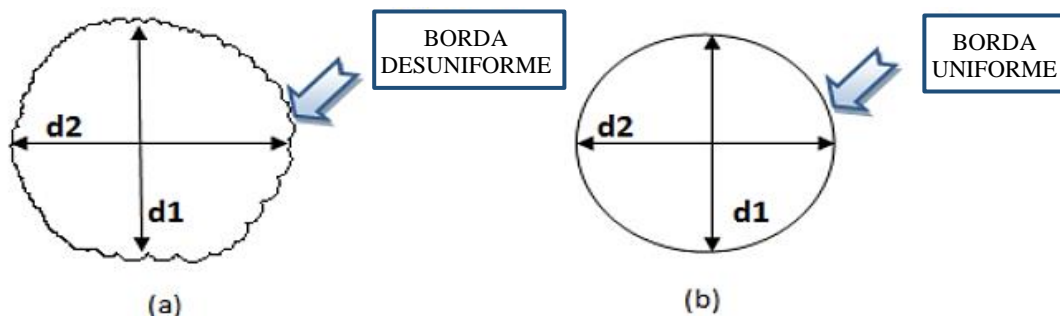


Figura 2.3 – Esquema ilustrando borda da argamassa autonivelante pós-espalhamento, indicando: a) borda desuniforme, característica de mistura com exsudação; e b) borda uniforme, desejável para o material (MARTINS, 2009).

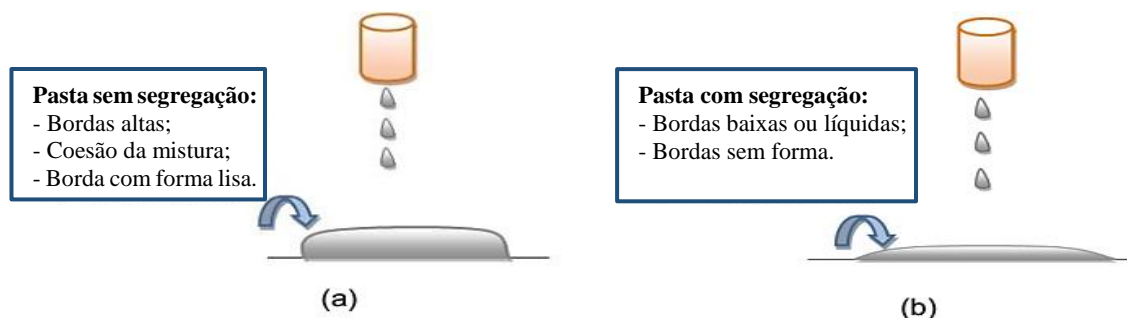


Figura 2.4 – Características visuais de argamassas autonivelantes pós-espalhamento, sendo: a) uma sem tendência à segregação; e b) uma com tendência à segregação (MARTINS, 2009).

Yang et al. (2016) resume em três as propriedades no estado fresco que caracterizam uma argamassa autonivelante, sendo elas: fluidez, coesão e homogeneidade. A coesão e a homogeneidade por eles citadas representam, juntas, a estabilidade da mistura. A fluidez, responsável pela promoção do auto adensamento, e a estabilidade são características bastante sensíveis, que devem sempre ser avaliadas em paralelo.

Silva (2016) relata que os aditivos normalmente empregados em argamassas autonivelantes são o aditivo superplastificante e o aditivo modificador de viscosidade, cujos objetivos na mistura são, respectivamente: alterar a fluidez e as condições de adensamento do composto; e controlar fenômenos como a exsudação e a segregação da mistura. Singelas mudanças na proporção destes aditivos são capazes de alterar completamente a consistência da mistura. Depois que uma formulação atinge, durante sua dosagem, propriedades adequadas, qualquer aumento na quantidade de aditivos, por menor que seja, pode provocar espalhamentos excessivos, bem como a exsudação e a segregação do material. Além disso, deve ainda ser sempre observada a forma como estes materiais influenciam no tempo de endurecimento da mistura, normalmente acelerado.

Martins (2009) e Souza et al. (2012) citam que até mesmo o procedimento de mistura, no que tange à ordem de inserção dos materiais, à energia de amassamento, à quantidade de água utilizada e ao tempo total para ele demandado, é um fator que exerce grande influência nas propriedades destas argamassas, tanto em seu estado fresco quanto endurecido. No estado endurecido, entre as principais propriedades consideradas para as argamassas autonivelantes estão sua resistência à tração, diretamente relacionada com a coesão interna do material, e a sua capacidade de aderir ao substrato (AZKARATE e CALVERA, 2005). A observação da permeabilidade desta argamassa é também essencial, visto que está diretamente relacionada à sua durabilidade.

Como anteriormente citado, a durabilidade da argamassa autonivelante costuma ser satisfatória, devido à sua reduzida permeabilidade, quando bem dosada, em função do elevado teor de aditivos e finos em sua mistura. A baixa permeabilidade é uma característica valiosa para materiais cimentícios, bem como para qualquer material comumente utilizado na construção civil. Visto que, conforme cita a NBR 15.575-3 (ABNT, 2013), o controle adequado da umidade de uma edificação é a chave para o combate à ocorrência de muitas manifestações patológicas, capazes de reduzir sua vida útil, bem como seu valor de uso e troca.

Neste trabalho, as características das argamassas formuladas verificadas no estado fresco foram: consistência, tempo de fluxo, tempo de cura, densidade de massa e teor de ar incorporado.

### **2.1.3. Prescrições normativas aplicáveis ao uso de argamassas autonivelantes**

No Brasil, até então, inexistem normas referentes a ensaios e aplicações de argamassas autonivelantes, o que acaba por dificultar a disseminação do produto em âmbito nacional. Na Europa e nos Estados Unidos, por outro lado, algumas normas e recomendações pautadas em especificações para este material já se encontram disponíveis.

Entre as referidas prescrições normativas estão as normas espanholas UNE-EN 13.813 (AENOR, 2003), a respeito de pastas autonivelantes, contendo características e especificações, e a UNE-EN 13.318 (AENOR, 2001), que trata de revestimentos contínuos; as recomendações da federação europeia de especialistas em construção, como a EFNARC (2001), referente a métodos de ensaio para pisos cimentícios autonivelantes com polímeros, e a EFNARC (2002), dedicada à avaliação das propriedades de concretos autoadensáveis, mas que também auxilia na determinação de propriedades no estado fresco de argamassas autonivelantes; e a norma americana ASTM C1708 (ASTM, 2017), que prevê alguns ensaios aplicáveis para a observação do desempenho de argamassas autonivelantes, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

A UNE-EN 13.318 (AENOR, 2001) apresenta classificações para as argamassas autonivelantes e, no que tange ao tipo de aglomerante, as formulações produzidas na presente pesquisa podem ser ditas “Tipo CT”, considerando sua base cimentícia. A referida norma cita que as propriedades deste material podem variar, adaptando-se às solicitações inerentes a cada uso determinado, podendo apresentar, portanto, diferentes resistências, tempos em aberto distintos e assim por diante.

Como são poucas as normas existentes referentes a este material, em alguns casos, para a avaliação de suas propriedades, especialmente no estado fresco, são aplicadas as recomendações de literaturas consagradas, como é o caso das prescritas no trabalho de Kantro (1980). Estudos como o de Silva (2016), Souza et al. (2012) e Nakakura e Bucher (1997) empregaram a metodologia de Kantro para a verificação da consistência das argamassas autonivelantes por eles formuladas. Sendo que, originalmente, os métodos propostos por Kantro (1980) eram empregados apenas para a análise de pastas. No entanto,

considerando a fluidez das argamassas estudadas, em alguns casos, métodos de ensaio utilizados para pastas são adaptados para a verificação de suas propriedades.

Ainda sobre recomendações aplicáveis à avaliação das propriedades das argamassas autonivelantes no estado fresco, além daquela a pouco citada, existem as indicações da EFNARC (2002), que sugerem o uso do mini slump-test e do mini funil-V para a determinação da consistência e do tempo de fluxo do material, respectivamente. Estes métodos foram empregados em diversas pesquisas, como as de Katsiadramis et al. (2010), Rizwan e Bier (2012), Güneyisi et al. (2015), Rubin (2015) e Güneyisi et al. (2016). Nesta pesquisa, optou-se por também aplicar as recomendações da EFNARC (2002), como melhor detalhado no Programa Experimental.

## **2.2. Agregados reciclados**

Martínez et al. (2016) relata que a exploração massiva de reservas naturais pela indústria da construção civil é um processo contínuo, que tem atravessado gerações e provocado uma extensa degradação ambiental, de modo gradual. Deste modo, a incorporação de políticas de reciclagem que permitam o desenvolvimento efetivo da sustentabilidade no setor construtivo é uma atitude vital.

Com o intuito de reduzir a utilização de matérias-primas na produção de argamassas e concretos, minimizando o volume de material constantemente extraído da natureza, bem como de neles incorporar resíduos outrora descartados pelo sistema produtivo, têm sido propostos nas últimas décadas estudos acerca da avaliação dos efeitos do uso de agregados reciclados na composição de concretos e argamassas, a exemplo dos de Leite (2001), Kou e Poon (2009), Evangelista e Brito (2010), Pereira (2010), Cordeiro (2013), Reis (2013), Malta et al. (2014), Cuenca-Moyano et al. (2014), Martínez et al. (2016) e tantos outros.

A este estudo cabe, de modo semelhante, a verificação dos efeitos da incorporação destes agregados, especialmente daqueles provenientes do beneficiamento de resíduos de concreto, em formulações de argamassas autonivelantes. Foram avaliados os efeitos de seu uso sobre as propriedades do material no estado fresco, de modo a propor a reinserção destes resíduos no ciclo produtivo, desde que identificada a viabilidade técnica de fazê-lo sem prejudicar as propriedades deste produto.

### 2.2.1. Resíduos de concreto

A Resolução nº 307 do CONAMA (MMA, 2002) define “reciclagem” enquanto um processo por meio do qual faz-se possível o reaproveitamento de um resíduo, previamente submetido à transformação, e Resíduo de Construção Civil (RCC) como sendo aquele advindo de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, constituídos por materiais diversos. A mesma classifica estes resíduos de acordo com a sua potencialidade à reutilização e/ou reciclagem, enquadrando na Classe A aqueles altamente passíveis de serem utilizados como agregados. Os resíduos de concretos e argamassas, por exemplo, estão englobados na referida classe.

Pereira (2010) cita que, uma vez que o agregado reciclado de concreto é formado a partir da trituração de elementos deste material, é normal em sua constituição materiais pétreos, advindos dos agregados originais, e ainda vestígios de argamassa, neles aderida, como mostra a Figura 2.5. Considerando que na presente pesquisa foi utilizado o agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC), de modo geral, pode-se dizer que ele é composto primordialmente por frações da própria argamassa.

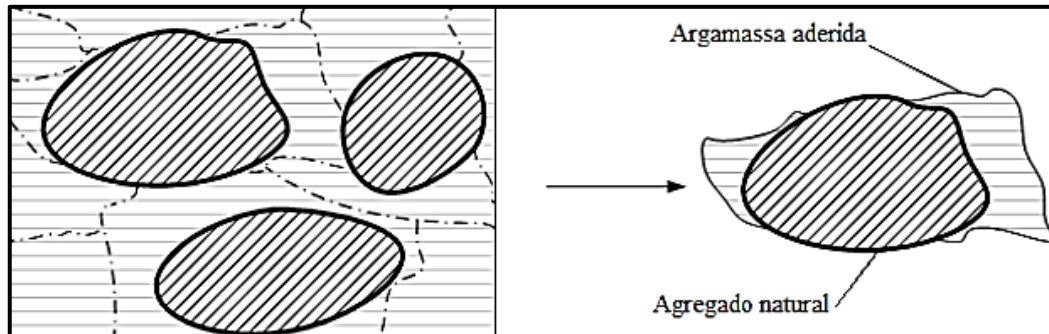


Figura 2.5 – Formação dos agregados reciclados de concreto (PEREIRA, 2010).

De acordo com Solyman (2005), a densidade das partículas de agregados finos reciclados de concreto costuma variar entre 2,0 e 2,5 kg/cm<sup>3</sup>, sua superfície é em geral mais áspera que a de agregados naturais e sua forma depende do método adotado para o processamento do material demolido. A rugosidade de sua superfície, somada a uma porosidade acentuada destes agregados, costuma conduzir a uma absorção de água mais expressiva durante a produção de novos concretos, superior a habitual para um agregado comum. Por isso, normalmente quantidades maiores deste líquido acabam sendo requeridas,

ou ainda teores superiores de aditivos superplastificantes, de modo a manter a trabalhabilidade desejada para a mistura.

Conforme Schulz (1993), a absorção de água é a característica mais importante dos agregados reciclados, a ser considerada durante a produção de concretos e argamassas. Visto que, se os poros destes agregados não estiverem saturados, eles serão capazes de extrair água da pasta, prejudicando a trabalhabilidade da mistura. Três métodos são propostos por este autor para a minimização da absorção da água de amassamento pelos agregados reciclados: a adição de água suplementar à mistura, a pré-saturação dos agregados e a adição de água à argamassa já no local de aplicação, considerando apenas a trabalhabilidade requerida. Dentre os três, Miranda (2005) considera melhor e mais preciso o método de pré-saturação, mas relata também que o agregado pode vir a ficar excessivamente úmido, alterando a relação água / cimento (a/c) da mistura.

Para Lima (2000), o agregado precisa ser deixado em contato com a água por pelo menos dois minutos antes que o cimento seja adicionado, de modo a controlar sua absorção. Para Leite (2001), por sua vez, o tempo de saturação do agregado varia de acordo com alguns fatores, dentre eles o tamanho do agregado, visto que quanto menores forem suas partículas, mais rápida será a saturação do mesmo. Além do citado, Leite (2001) relata a possibilidade de um transporte inverso de água, caso o agregado seja excessivamente saturado, do agregado para a matriz cimentícia.

Em seu estudo, Evangelista e Brito (2010) observaram que, mesmo que o emprego de AMRC em substituição total ao agregado miúdo natural (AMN) presente no traço possa levar o concreto produzido a sérias dificuldades no que tange a durabilidade, devido ao aumento de sua permeabilidade, teores reduzidos desta substituição (por exemplo, 30%) são viáveis para a utilização, até mesmo na produção de concretos estruturais.

Leite (2001), ao avaliar em sua pesquisa a microestrutura de concretos com agregados naturais e daqueles com agregados reciclados, apontou uma importante vantagem destes últimos: agregados reciclados permitem a formação de produtos de hidratação sobre sua superfície porosa e rugosa, uma vez que há absorção de pasta de cimento pelo material. Isto auxilia na densificação da zona de transição entre pasta e agregado e, conseqüentemente, conduz a uma melhor aderência entre estes. A Figura 2.6, a seguir, permite observar esta densificação da zona de transição quando empregado um agregado reciclado ao invés de um agregado natural.

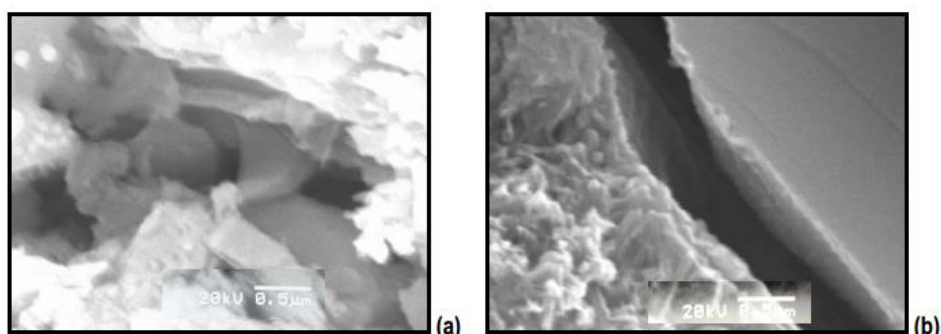


Figura 2.6 – Microscopias com aproximação de 33.000x. a) Concreto com agregado reciclado de concreto; b) Concreto de referência, com agregado natural (LEITE, 2001).

De modo geral, Fan et al. (2016) cita que o AMRC pode ser utilizado na produção de concretos (bem como de argamassas), em substituição ao AMN. No entanto, deve-se sempre levar em consideração para tanto que o teor de substituição é um importante fator, capaz de afetar características físicas e mecânicas do material resultante, além daquelas relacionadas à durabilidade do mesmo.

### 2.2.2. Prescrições normativas aplicáveis ao uso de agregados reciclados

No Brasil, a NBR 15.116 (ABNT, 2004) é a norma que trata da utilização de agregados reciclados, provenientes do beneficiamento de resíduos sólidos da construção civil. A referida norma indica que o emprego destes materiais seja especialmente em obras de pavimentação e na constituição de concretos sem função estrutural. Ela divide os agregados reciclados em Agregados de Resíduos de Concreto (ARC) e Agregados de Resíduos Mistos (ARM). Na presente pesquisa, como citado, foi utilizado um ARC.

A NBR 15.116 (ABNT, 2004) indica alguns ensaios a serem aplicados para a caracterização do agregado reciclado, a exemplo do de absorção. O sugerido, neste caso, é o ensaio padronizado pela NBR NM 30 (ABNT, 2001), mesma utilizada para agregados naturais. No entanto, no presente trabalho foi adotado um método alternativo para a definição da taxa de absorção dos agregados, em questão o proposto por Leite (2001), que em diversos estudos anteriores já se mostrou mais adequado para a caracterização do agregado reciclado, ao reduzir a variabilidade de seus resultados.

Além da norma brasileira, existem diversas outras pautadas em classificações e especificações para o uso de agregados reciclados, como a alemã DIN 4226-100 (DIN, 2002), a chinesa WBTC nº 12 (WBTC, 2002), a do Reino Unido BS 8500-2 (BS, 2002), a portuguesa E 471 (LNEC, 2006), dentre tantas outras.



### 2.3. Aplicação de aditivos químicos e adições minerais

Normalmente, aditivos químicos e adições minerais são adicionados à composição de concretos e argamassas com o intuito de implementar suas propriedades. Seu uso é capaz de permitir para estes materiais a redução da permeabilidade, o aumento da resistência, a melhoria da trabalhabilidade, o ajuste da coesão da mistura, o controle do tempo de pega, a promoção de maior durabilidade, dentre outras possibilidades. Nesta pesquisa foram empregados três aditivos químicos, em questão o Superplastificante (SP), o Modificador de Viscosidade (MV) e o Plastificante Polifuncional (PP); e uma adição mineral, no caso a sílica ativa.

Sobre o aditivo superplastificante, a fluidez de uma argamassa autonivelante é diretamente proporcional à quantidade deste aplicada à sua mistura, uma vez que é ele o responsável pela dispersão das partículas e, conseqüentemente, pelo aumento da fluidez (SILVA, 2016). Gowda et al. (2011) confirmaram em seu estudo, também baseado em uma pesquisa com argamassa autonivelante, que existe um limite para o uso de aditivo superplastificante, acima do qual a estabilidade do material está propensa a sofrer prejuízos, ao passo que se abrem caminhos para a exsudação e para a segregação da argamassa produzida.

Carvalho (2015), de modo semelhante, cita que o aumento do teor de aditivo SP, com base de policarboxilato, ou ainda da relação água / cimento (a/c), tende a induzir o aumento do índice de segregação das argamassas. No entanto, ele relata ainda que a dosagem deste aditivo nem sempre é linear e depende diretamente da relação a/c da mistura. O aditivo SP foi utilizado nesta pesquisa em todos os traços com aditivos combinados (traços tipo C).

O uso de aditivo modificador de viscosidade, por sua vez, auxilia no controle de segregação de uma mistura, especialmente quando a quantidade de finos presentes na mesma é reduzida, e ajuda a promover uma excelente homogeneidade para a argamassa (EFNARC, 2002). Martins (2009) cita ainda que este aditivo, em quantidades moderadas, melhora a coesão do material, ao manter suas partículas finas em suspensão.

Segundo Libre et al. (2010), o aditivo MV é uma ferramenta muito eficaz na estabilização do autoadensamento da mistura, bem como na prevenção da exsudação e da segregação da mesma. Além disso, eles citam que o aditivo MV ajuda a mitigar os efeitos das mudanças de materiais e de suas respectivas proporções em argamassas, compensando, por exemplo, o baixo teor de finos e a reduzida graduação dos agregados presentes na

formulação. O aditivo MV foi também utilizado neste estudo em todos os traços com aditivos combinados (traços tipo C).

Quanto ao aditivo polifuncional, existem diversos tipos deste, cujo diferencial é a possibilidade de combinar, em um único aditivo, a função de dois ou mais. O aditivo polifuncional utilizado nesta pesquisa, por exemplo, é um plastificante polifuncional, como citado, o qual foi empregado nas formulações com aditivo específico (traços tipo E). Ele é capaz de paralelamente reduzir a água de amassamento da mistura, aumentar sua fluidez e melhorar a coesão da mesma, além de facilitar o adensamento do material no qual é empregado (GCPAT, 2017<sup>a</sup>).

No que se refere a aplicação de adições minerais, estas são também capazes de auxiliar no controle da estabilidade de argamassas, visto que sua grande área superficial absorve quantidade representativa da água disponível, reduzindo a água livre e, assim, a possibilidade de exsudação. No entanto, grandes montantes de adições podem prejudicar a fluidez da mistura, aumentando sua viscosidade e promovendo uma redução em seu espalhamento (SAFIUDDIN et al., 2011).

Segundo Nakakura e Bucher (1997), o emprego de adições minerais, em especial da sílica ativa, empregada neste estudo, é capaz de evitar fenômenos como a retração, a exsudação e a fissuração. Fonseca (2010) relata que a sílica ativa é considerada uma das adições minerais mais reativas, dotada de partículas muito finas e de uma elevada área específica. Ele cita que seu uso promove a densificação da zona de transição pasta-agregado, reduzindo o volume de vazios presentes na mesma e permitindo a formação de uma microestrutura mais densa e homogênea para os concretos e argamassas com ela dosados. O emprego da sílica no presente trabalho levou em consideração sua presença no traço base utilizado (pré-existente na literatura, como melhor descrito no capítulo seguinte), de modo a reduzir os ajustes para ele necessários.

### **3. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

A presente pesquisa buscou avaliar a viabilidade técnica da produção de argamassas autonivelantes com incorporação de agregado reciclado de concreto, estudando especialmente suas características no estado fresco. Para tanto, foram definidos parâmetros fixos e variáveis do estudo, as matérias-primas empregadas na composição dos traços formulados e os métodos de ensaio utilizados para avaliar suas propriedades, como segue explicitado.

#### **3.1. Parâmetros fixos e variáveis da pesquisa**

Nesta pesquisa, foram mantidos fixos, para todas as argamassas formuladas: a ordem de mistura dos materiais, o tipo de misturador utilizado e o traço base. Por outro lado, foram considerados fatores controláveis e, portanto, variáveis do estudo: o teor de substituição de agregado miúdo natural (AMN) por agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC) e a combinação de aditivos utilizada nas misturas produzidas.

Foram teores de substituição por agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC) avaliados no presente estudo: 0 %, 25 %, 50 % e 75 %, sendo o primeiro dentre estes o traço de referência. As substituições foram todas realizadas em volume, não em massa, como melhor explicitado na sequência. A opção pelo emprego dos teores citados foi motivada pela observação daqueles adotados nos estudos de Khatib (2005), Kou e Poon (2009), Malta et al. (2014), Moyano et al. (2014), Martínez et al. (2016), entre outros, que, durante seus testes com a incorporação de agregados reciclados, utilizaram porcentagens semelhantes de substituição de agregados miúdos naturais (AMN).

Quanto às combinações de aditivos, foram analisadas duas para cada teor de substituição anteriormente citado, sendo elas: 1) O emprego paralelo de Aditivo Superplastificante (SP) e de Aditivo Modificador de Viscosidade (MV); e 2) O uso isolado de um Aditivo Plastificante Polifuncional (PP), específico para argamassas autonivelantes, o qual atua simultaneamente tanto na dispersão de partículas quanto na modificação da reologia das argamassas formuladas. Assim sendo, a Tabela 3.1, disposta na sequência, apresenta as oito formulações propostas nesta pesquisa.

Tabela 3.1 – Traços propostos na presente pesquisa e suas respectivas descrições.

| Nomenclatura do traço | Porcentagem de AMRC (%) | Aditivo utilizado |    |    | Descrição  |
|-----------------------|-------------------------|-------------------|----|----|--|
|                       |                         | SP                | MV | PP |  |
| REF-C                 | 0                       | X                 | X  | -  | Traço de referência, sem agregado reciclado e com aditivos combinados (SP + MV). |
| REF-E                 | 0                       | -                 | -  | X  | Traço de referência, sem agregado reciclado e com aditivo específico (PP).       |
| AMRC25-C              | 25                      | X                 | X  | -  | Traço com 25% de agregado reciclado e aditivos combinados (SP + MV).             |
| AMRC25-E              | 25                      | -                 | -  | X  | Traço com 25% de agregado reciclado e aditivo específico (PP).                   |
| AMRC50-C              | 50                      | X                 | X  | -  | Traço com 50% de agregado reciclado e aditivos combinados (SP + MV).             |
| AMRC50-E              | 50                      | -                 | -  | X  | Traço com 50% de agregado reciclado e aditivo específico (PP).                   |
| AMRC75-C              | 75                      | X                 | X  | -  | Traço com 75% de agregado reciclado e aditivos combinados (SP + MV).             |
| AMRC75-E              | 75                      | -                 | -  | X  | Traço com 75% de agregado reciclado e aditivo específico (PP).                   |

Fonte: a autora.

Como variáveis de resposta da pesquisa, por sua vez, obteve-se os adequados teores de aditivos para que cada formulação chegasse a características próprias de uma argamassa autonivelante, com consistência, tempo de fluxo e configuração visual adequadas; bem como a quantidade de água exsudada, o tempo de cura, a densidade de massa e o teor de ar incorporado de cada uma das argamassas produzidas. A Figura 3.1, a seguir, apresenta de forma simplificada os procedimentos adotados para a realização do estudo.

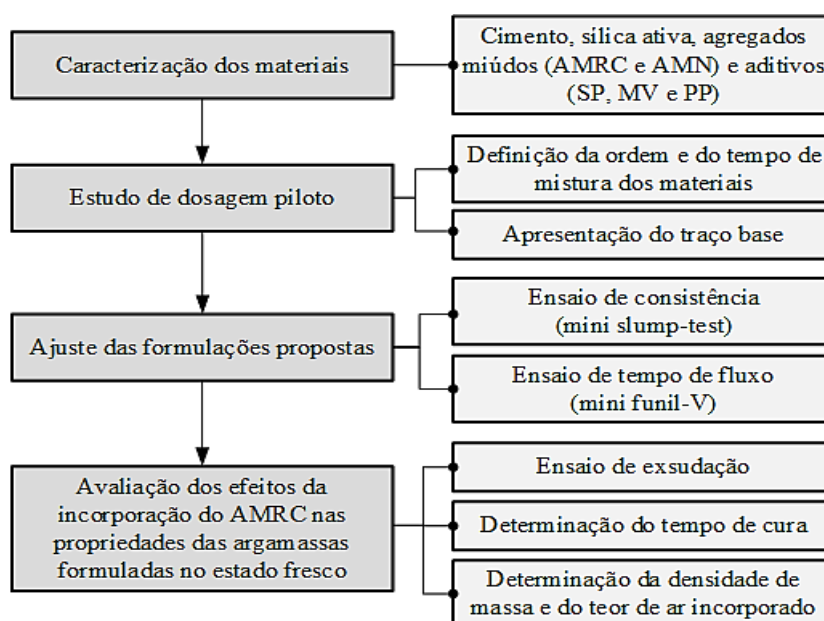


Figura 3.1 – Procedimentos adotados para a realização da pesquisa (Fonte: a autora).

## **3.2. Materiais utilizados**

Estão listados neste subcapítulo os materiais utilizados para a constituição das formulações propostas no trabalho, acompanhados de sua caracterização e da descrição dos métodos empregados para caracterizá-los.

### **3.2.1. Cimento**

Em diversas pesquisas com argamassas autonivelantes, como as de Martins (2009), Souza et al. (2012), Silva (2016), entre outras, é comum o emprego de cimentos de alta resistência inicial (CPV ARI), especialmente devido ao rápido endurecimento que ele permite ao material, à sua elevada finura e, claro, ao veloz ganho de resistência por ele conferido. Por se tratar de um material autonivelante, a elevada finura é uma característica desejável, visto que materiais deste tipo costumam requerer o uso de um alto teor de finos em sua composição.

Apesar disso, ao usar o CPV ARI, especialmente em pisos e contrapisos, que ocupam grandes áreas, deve-se ter um cuidado especial com o preparo e a cura da argamassa, considerando a recorrência de casos de retração, devido a grande finura e ao elevado calor de hidratação liberado por este cimento. Ainda assim, seguindo a tendência de trabalhos disponíveis na literatura, como os citados, optou-se por utilizar um cimento deste tipo, o qual além dos benefícios elencados é um material mais puro, com menos adições e, portanto, que apresenta menor variabilidade.

A massa específica média do cimento empregado no estudo foi de 3,09 g/cm<sup>3</sup>, definida de acordo com as indicações da NBR 16.605 (ABNT, 2017). Este material, conforme o fabricante e o apresentado na Tabela 3.2, atende ao recomendado nas normas NBR 5733 (ABNT, 1991) e NBR 5737 (ABNT, 1992). Vale observar que estas duas normas foram substituídas pela NBR 16.697 (ABNT, 2018), no entanto, esta substituição se deu após a caracterização do mesmo. A Tabela 3.3, por sua vez, apresenta os resultados da análise química do CPV ARI, realizada pelo método da fluorescência de raios-X (FRX) no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Tabela 3.2 – Ensaio físicos do cimento utilizado (valores médios de referência do fabricante e limites normativos).

| Característica / Propriedade       | Unidade            | Valor fornecido pelo fabricante | Limite da NBR 5733 (ABNT, 1991) |
|------------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Resistência à compressão (1 dia)   | MPa                | 29,0                            | ≥ 14,0                          |
| Resistência à compressão (3 dias)  | MPa                | 35,0                            | ≥ 24,0                          |
| Resistência à compressão (7 dias)  | MPa                | 40,0                            | ≥ 34,0                          |
| Resistência à compressão (28 dias) | MPa                | 47,0                            | -                               |
| Área específica (Blaine)           | cm <sup>2</sup> /g | 3600                            | ≥ 3000                          |
| Tempo de início de pega            | h:m                | 2:15                            | ≥ 1:00                          |
| Tempo de fim de pega               | h:m                | 3:25                            | ≤ 10:00                         |

Fonte: adaptado de Ciplan (2018).

Tabela 3.3 – Análise química do cimento empregado na pesquisa.

| Componente químico              | % massa obtida no ensaio | % massa recomendada pela NBR 5733 (ABNT, 1991) |
|---------------------------------|--------------------------|--|
| CaO                             | 68,7968                  | -  |
| MgO                             | 10,7759                  | ≤ 6,5  |
| SO <sub>3</sub>                 | 6,9519                   | ≤ 3,5  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 4,6404                   | -  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 4,2448                   | -  |
| SiO <sub>2</sub>                | 1,5017                   | -  |
| K <sub>2</sub> O                | 1,3399                   | -  |
| Na <sub>2</sub> O               | 0,9783                   | -  |
| SrO                             | 0,5069                   | -  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | 0,1522                   | -  |
| MnO                             | 0,0849                   | -  |
| NiO                             | 0,0263                   | -  |
| <b>C<sub>3</sub>A calculado</b> | <b>3,3971</b>            | -  |

Fonte: a autora.

Como se pode observar na Tabela 3.3, os teores de MgO e SO<sub>3</sub> disponíveis no cimento utilizado foram um pouco maiores que os recomendados pela NBR 5733 (ABNT, 1991), não havendo limites discriminados nesta norma para os demais componentes químicos analisados. Quanto ao C<sub>3</sub>A calculado para este material, o mesmo foi de aproximadamente 3,40 %, podendo o cimento ser qualificado como resistente a sulfatos, visto que o C<sub>3</sub>A foi menor que 8,00 %.

Foi também realizada a caracterização granulométrica do CPV ARI utilizado, novamente com o apoio do laboratório da UFRGS. Para o ensaio, fez-se uso de um analisador de tamanho de partículas (granulômetro) modelo CILAS 1180. O cimento obteve um diâmetro inferior a 3,74  $\mu\text{m}$  em 10 % de suas partículas, de até 20,67  $\mu\text{m}$  em 50 % das partículas e inferior a 39,55  $\mu\text{m}$  em 90 % das partículas. Logo, o diâmetro médio de seus grãos, resultante da caracterização granulométrica, foi de 21,42  $\mu\text{m}$ . A distribuição granulométrica deste cimento está ilustrada na Figura 3.2, abaixo.

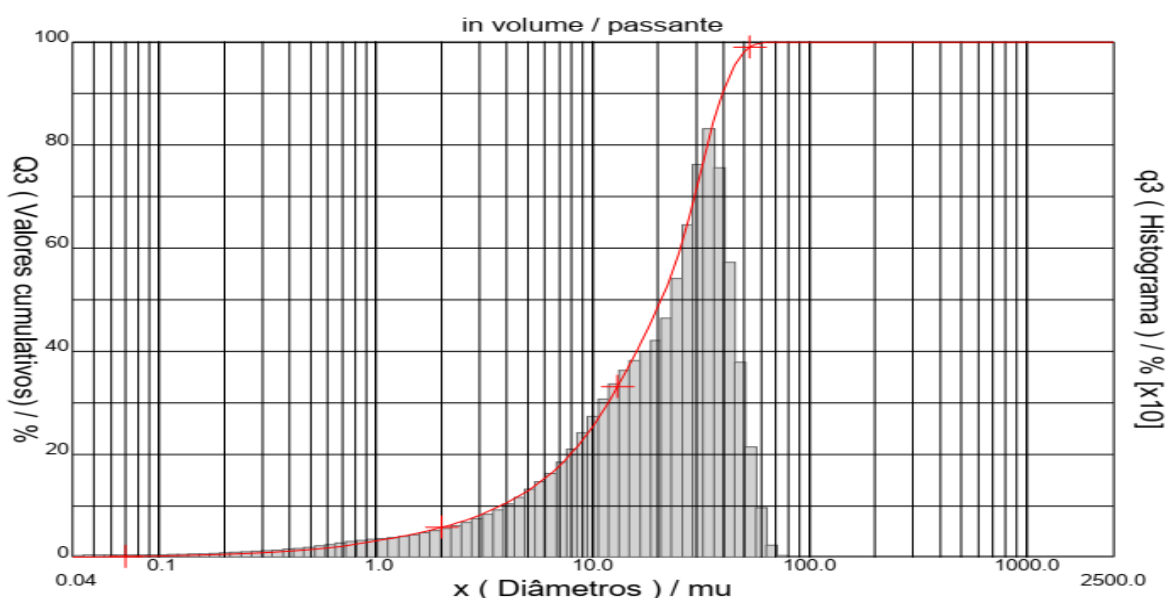


Figura 3.2 – Distribuição granulométrica do cimento (Fonte: a autora).

### 3.2.2. Sílica ativa

Optou-se pelo uso da sílica ativa enquanto adição mineral na presente pesquisa devido a sua presença na composição do traço base das formulações propostas, pré-existente na literatura, estudado por Souza et al. (2012), como melhor descrito na sequência. Houve o intuito de com sua utilização reduzir a necessidade de ajustes na dosagem original destes autores, bem como de auxiliar no emprego dos agregados reciclados, visto que sua fina granulometria pode ser útil no tamponamento dos poros destes resíduos, combatendo a elevada absorção dos mesmos.

A sílica ativa utilizada nas argamassas formuladas possui uma massa específica de 2,18  $\text{g}/\text{cm}^3$  e a Figura 3.3 apresenta o seu difratograma, resultado do ensaio de Difração de Raios-X realizado com o apoio do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), fazendo uso de um difratômetro Siemens / Bruker D-5000.

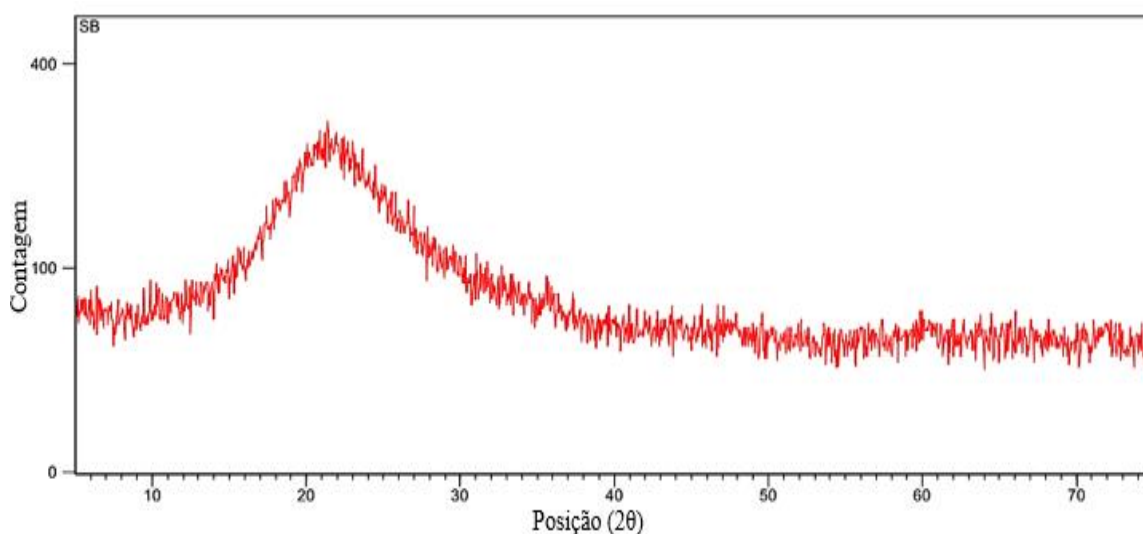


Figura 3.3 – Difratograma da sílica ativa utilizada na pesquisa (Fonte: a autora).

Como se faz possível observar através da Figura 3.3, abaixo da linha resultante da difração formou-se uma expressiva curva, também denominada de “halo amorfo”. Esta ocorrência é característica em materiais amorfos (vítreos), que possuem uma elevada reatividade e, por isso, costumam ser eficazes como adição pozolânica. Logo, este ensaio forneceu um indicativo da pozolanicidade da sílica ativa utilizada no estudo.

A caracterização granulométrica deste material, assim como a do cimento, foi realizada no laboratório da UFRGS com um granulômetro modelo CILAS 1180. A sílica ativa obteve um diâmetro inferior a 8,34  $\mu\text{m}$  em 10 % de suas partículas, de até 67,43  $\mu\text{m}$  em 50 % das partículas e inferior a 186,78  $\mu\text{m}$  em 90 % das partículas. O diâmetro médio dos grãos deste material, obtido através do uso do aparelho, foi, então, de 84,17  $\mu\text{m}$ . A Figura 3.4 ilustra a distribuição granulométrica da sílica ativa.

Vale observar que o diâmetro médio encontrado para este material é maior que o normalmente identificado, como se pode notar nos trabalhos de Souza et al. (2012) e de Martins (2009), por exemplo, nos quais obteve-se valores abaixo de 0,20  $\mu\text{m}$  para o diâmetro médio das partículas da sílica ativa. Esta ocorrência, por sua vez, pode apenas indicar a aglomeração dos grãos presentes na amostra enviada para ensaio.



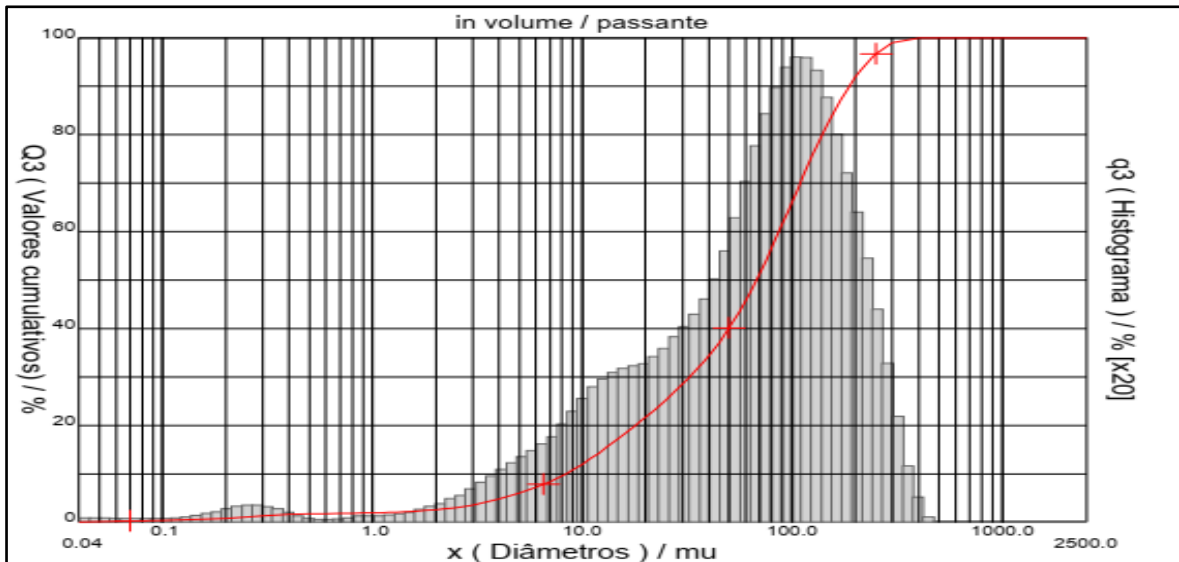


Figura 3.4 – Distribuição granulométrica da sílica ativa (Fonte: a autora).

### 3.2.3. Agregados miúdos

Nas formulações propostas nesta pesquisa, dois tipos de agregados miúdos estiveram presentes: o natural (AMN) e o reciclado de concreto (AMRC). O AMN empregado foi uma areia natural quartzosa e o AMRC foi o resultado da britagem e do peneiramento de resíduos de concreto, disponíveis para descarte no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (UFPA), campus Belém.

Para a caracterização do AMN, foi inicialmente realizada a amostragem da areia adquirida, de modo semelhante ao recomendado na Tabela 1 da NBR NM 26 (ABNT, 2009). Na sequência, procedeu-se com a redução das amostras separadas, através de seu quarteamento, de acordo com o Método B apresentado na NBR NM 27 (ABNT, 2001).

A determinação da composição granulométrica do material foi feita seguindo-se as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para a definição da massa específica do AMN, por sua vez, foram observadas as recomendações da NBR NM 52 (ABNT, 2009); para a verificação de sua massa unitária, levaram-se em conta as indicações da NBR NM 45 (ABNT, 2006); e, para a obtenção do seu teor de absorção, seguidas as especificações da NBR NM 30 (ABNT, 2001). Além destas características, foi também verificado o teor de material passante na peneira 75 $\mu$ m e, para tanto, a quantidade de finos extraídos por lavagem, fazendo-se uso da NBR NM 46 (ABNT, 2003).

A Tabela 3.4 mostra a composição granulométrica do AMN, bem como seu Módulo de Finura (MF) e sua Dimensão Máxima Característica (DMC). Outras características

identificadas para este material estão dispostas na Tabela 3.6, juntamente com os resultados encontrados para o AMRC, de modo a permitir uma melhor comparação entre estes dois agregados.

Tabela 3.4 – Características físicas do AMN.

| <b>Abertura da peneira (mm)</b>                  | <b>Amostra 1 (g)</b> | <b>Amostra 2 (g)</b> | <b>Média (g)</b> | <b>% retida</b> | <b>% retida acumulada</b> |
|--|----------------------|----------------------|------------------|-----------------|---------------------------|
| 4,8  | 0,00                 | 0,00                 | 0,00             | 0               | 0                         |
| 2,4  | 0,00                 | 0,00                 | 0,00             | 0               | 0                         |
| 1,2  | 1,61                 | 2,49                 | 2,05             | 0               | 0                         |
| 0,6  | 405,10               | 369,90               | 387,50           | 39              | 39                        |
| 0,3  | 284,41               | 268,65               | 276,53           | 28              | 67                        |
| 0,15   | 180,06               | 180,82               | 180,44           | 18              | 85                        |
| 0,075  | 67,75                | 95,38                | 81,57            | 8               | 93                        |
| Fundo  | 31,85                | 45,30                | 38,58            | 4               | 97                        |
| Fino extraído por lavagem                        | 26,28                | 28,40                | 27,34            | 3               | 100                       |
| <b>Total</b>                                     | <b>997,06</b>        | <b>990,94</b>        | <b>994,00</b>    | <b>100</b>      | <b>-</b>                  |
| <b>Módulo de Finura - MF</b>                     |                      |                      | <b>1,91</b>      |                 |                           |
| <b>Dimensão Máxima Característica - DMC (mm)</b> |                      |                      | <b>1,20</b>      |                 |                           |

Fonte: a autora.

O AMRC foi beneficiado por meio do uso de um britador de mandíbula e de um peneirador mecânico, utilizados para a britagem e para o peneiramento dos resíduos de concreto, respectivamente. A redução das amostras de AMRC foi realizada de modo semelhante ao feito para o AMN, seguindo-se as recomendações da NBR NM 27 (ABNT, 2001). Além disso, o agregado reciclado teve sua composição granulométrica definida conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), observando o indicado na Tabela 4 da NBR 15.116 (ABNT, 2004). A Tabela 3.5 apresenta os resultados obtidos para a composição granulométrica do AMRC.

Observando-se as Tabelas 3.4 e 3.5, bem como a Figura 3.5, disposta a seguir, é possível notar uma significativa semelhança entre as distribuições granulométricas do AMN e do AMRC. Esta proximidade entre as características dimensionais dos agregados empregados foi considerada vantajosa para a pesquisa, uma vez que tornou desnecessária a eventual adoção de um ajuste da curva granulométrica do agregado reciclado, de modo a deixa-la mais próxima da curva granulométrica do agregado natural e permitir uma comparação mais igualitária entre estes dois materiais.

Tabela 3.5 – Características físicas do AMRC.

| Abertura da peneira (mm)                         | Amostra 1 (g) | Amostra 2 (g) | Média (g)     | % retida   | % retida acumulada |
|--|---------------|---------------|---------------|------------|--------------------|
| 4,8  | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0          | 0                  |
| 2,4  | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0          | 0                  |
| 1,2  | 30,43         | 37,81         | 34,12         | 3          | 3                  |
| 0,6  | 319,31        | 331,40        | 325,36        | 32         | 35                 |
| 0,3  | 271,67        | 262,95        | 267,31        | 27         | 62                 |
| 0,15   | 212,10        | 207,64        | 209,87        | 21         | 83                 |
| 0,075  | 91,25         | 86,43         | 88,84         | 9          | 92                 |
| Fundo  | 54,15         | 41,86         | 48,01         | 5          | 97                 |
| Fino extraído por lavagem                        | 21,07         | 31,06         | 26,06         | 3          | 100                |
| <b>Total</b>                                     | <b>999,98</b> | <b>999,15</b> | <b>999,57</b> | <b>100</b> | <b>-</b>           |
| <b>Módulo de Finura - MF</b>                     |               |               | <b>1,83</b>   |            |                    |
| <b>Dimensão Máxima Característica - DMC (mm)</b> |               |               | <b>1,20</b>   |            |                    |

Fonte: a autora.

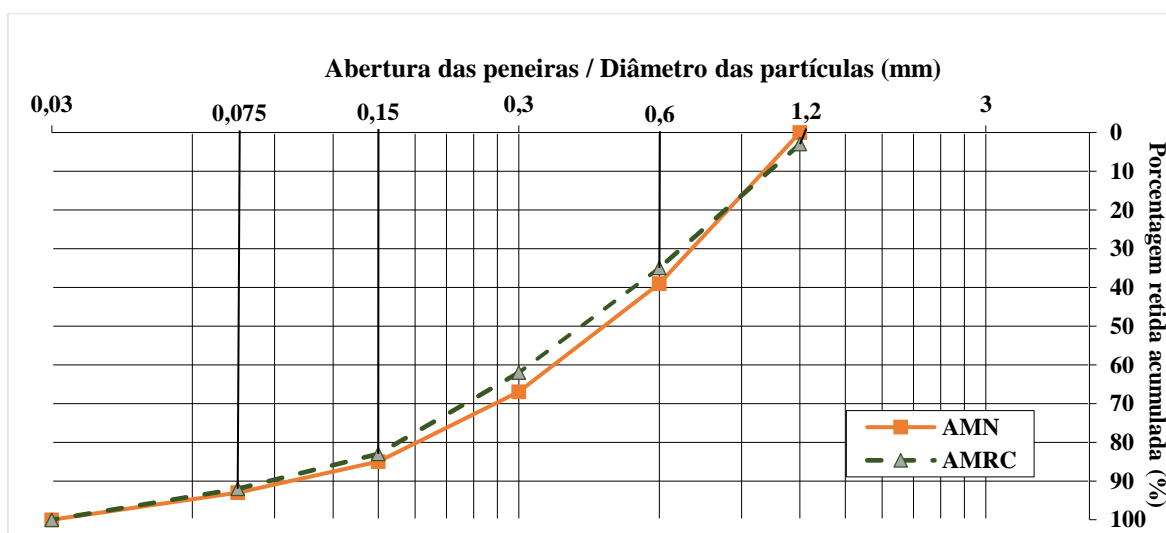


Figura 3.5 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos (Fonte: a autora).

O teor de absorção do AMRC não foi determinado fazendo-se uso da norma brasileira, empregada para o AMN, devido à variabilidade de seus resultados para este tipo de agregado, constatada por diversos autores que também trabalharam com o emprego de resíduos, como Leite (2001), Cordeiro (2013), Miranda (2005) e outros. A dificuldade em determinar a absorção de água de agregados reciclados pela referida norma se deve à elevada absorção deste agregado, bem como à grande presença de finos no mesmo, que complicam a determinação de sua massa na condição saturada superfície seca.

Para a definição do teor de absorção de água do AMRC foi, então, utilizada a metodologia desenvolvida por Leite (2001). A massa específica, a massa unitária e o teor de

material fino, passante na peneira 75 $\mu$ m, foram identificados através do uso das mesmas normas indicadas para o AMN. A Tabela 3.6 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do AMN e do AMRC, paralelamente.

Tabela 3.6 – Caracterização dos agregados miúdos, natural e reciclado.

| <b>Dados</b>   | <b>AMN</b> | <b>AMRC</b> |
|--|------------|-------------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )                      | 2,75       | 2,25        |
| Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )                        | 1,49       | 1,24        |
| Absorção de água (%)                                       | 1,76       | 21,00       |
| Teor de material fino, que passa na peneira 75 $\mu$ m (%) | 2,81       | 2,68        |

Fonte: a autora.

Como pode ser notado na Tabela 3.6, a massa específica e a massa unitária do agregado natural obtiveram resultados superiores àqueles observados para o agregado reciclado, da ordem de 18 % a mais para a massa específica e 17 % para a massa unitária. Isto caracteriza o AMRC enquanto um agregado mais leve que o AMN. Observa-se ainda que a absorção de água do AMRC chegou a se mostrar quase 12 vezes maior que a do AMN. O ocorrido com estes resultados, tanto da massa específica quanto da taxa de absorção, era esperado, visto que o agregado reciclado é um material mais poroso que o natural, principalmente devido ao seu processo de britagem por meio do qual é beneficiado. Além disso, eles corroboraram com o verificado por outros autores, a exemplo de Leite (2001).

No que tange ao teor de material fino e ao módulo de finura, os dois agregados apresentaram resultados próximos, visto que ambos possuíam uma grande quantidade de finos presentes. No entanto, pode ser dito que os grãos do AMRC ensaiado, de modo geral, foram um pouco menores que os do AMN, considerando que seu módulo de finura foi menor. Quanto maior o módulo de finura, mais grosso o material. Sobre a Dimensão Máxima Característica (DMC), esta foi mantida igual para ambos os agregados, em 1,20 mm, mediante o peneiramento do agregado reciclado com uma peneira de abertura igual a referida dimensão. Fez-se isto de modo a facilitar a comparação entre os resultados destes dois agregados e de restringir sua variabilidade.

Novamente com o intuito de verificar semelhanças e diferenças entre o AMRC e o AMN, neste caso no que tange à sua morfologia, foram geradas imagens com microscópio digital eletrônico desses dois agregados, mostradas na Figura 3.6. Nela, é possível notar que o AMN possui um formato mais definido, enquanto que o AMRC, obtido mediante um

processo de britagem, tem sua estrutura externa mais irregular e porosa, além de nele ser observada uma maior quantidade de finos.

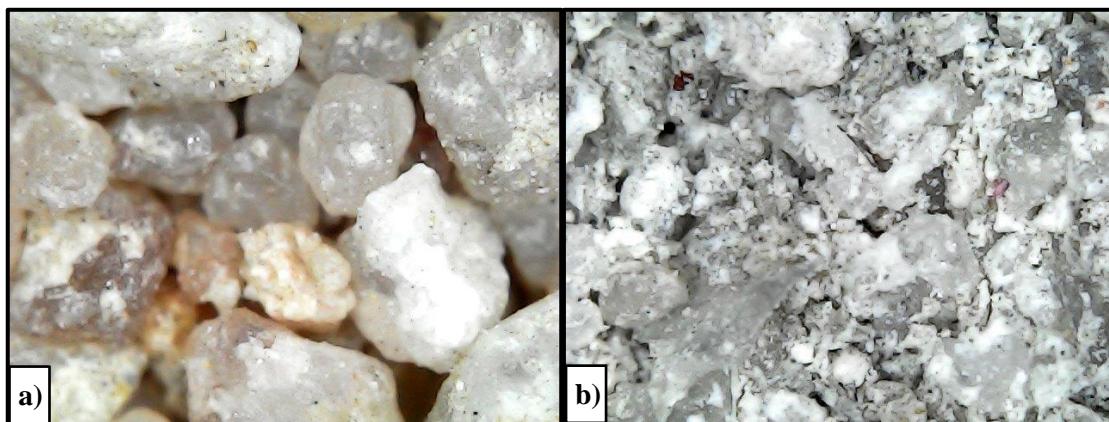


Figura 3.6 – Imagens de microscópio digital eletrônico do AMN (a) e do AMRC (b), com aproximação de 1.000x (Fonte: a autora).

É importante citar que, previamente ao emprego do AMRC nos traços que o continham, foi realizada a sua pré-saturação (ou pré-molhagem), de modo semelhante ao aplicado por pesquisadores como Leite (2001), Miranda (2005) e Güneyisi et al. (2016). Leite (2001) e Miranda (2005) também utilizaram agregados reciclados em seus estudos. Güneyisi et al. (2016), por sua vez, avaliaram a utilização de agregados leves, no entanto, fizeram da mesma maneira o uso da pré-saturação.

Em todos os casos citados, bem como na presente pesquisa, este procedimento foi adotado com o intuito de controlar a absorção pelo agregado da água de amassamento da argamassa. Vale observar que, além de já estar sendo largamente empregada, a pré-saturação é ainda uma recomendação da NBR 15.116 (ABNT, 2004). Como melhor detalhado mais a frente, no subcapítulo referente ao Estudo de Dosagem Piloto, foi aplicada neste estudo uma taxa de compensação da absorção de água do AMRC de 70 %.

#### **3.2.4. Aditivos**

Três tipos de aditivos foram empregados nas formulações de argamassas autonivelantes propostas, sendo eles: um Plastificante Polifuncional (PP), um Superplastificante (SP) e um Modificador de Viscosidade (MV). Nos traços em que esteve presente, o aditivo PP foi utilizado individualmente, visto que além de possuir propriedade dispersante, atua também nas argamassas como modificador reológico. Os aditivos SP e MV,

por outro lado, foram sempre aplicados em conjunto, considerando que cada um deles é, separadamente, responsável por um dos efeitos promovidos pelo aditivo PP.

O aditivo PP utilizado na pesquisa é um produto específico para argamassa autonivelante que, conforme citado, tem função dupla, agindo tanto na dispersão de partículas (e conseqüentemente na melhoria da trabalhabilidade da mistura), quanto na manutenção da coesão do material (evitando sua segregação e exsudação). Este aditivo é um líquido alaranjado, à base de policarboxilato, com massa específica média de 1,015 g/cm<sup>3</sup>, definida conforme a NBR 10.908 (ABNT, 2008). Segundo o fabricante, é recomendável utiliza-lo em teores entre 0,3 % e 1,2 % da massa de cimento do traço (GCPAT, 2017a).

O aditivo SP empregado é um líquido alaranjado, também à base de policarboxilato, com capacidade de incorporação de microbolhas de ar, ideal para concretos e argamassas de elevada fluidez. A massa específica média deste material é de 1,100 g/cm<sup>3</sup>, conforme o fabricante, o qual recomenda uma dosagem para o mesmo entre 0,3 % e 1,0 % da massa de cimento do traço (GCPAT, 2017b).

O aditivo MV aplicado, por sua vez, é um líquido viscoso, de coloração levemente amarelada a cinza, à base de um biopolímero único e patenteado pelo fabricante, com massa específica de aproximadamente 1,010 g/cm<sup>3</sup>. O fabricante recomenda que sua dosagem esteja entre 0,1 % e 0,6 % da quantidade de cimento do traço (GCPAT, 2017c).

No presente estudo, nas formulações com aditivos combinados, foram a princípio consideradas as proporções de aditivos SP e MV presentes no traço base, apresentado na sequência. Nas formulações com aditivo específico (PP), por sua vez, por não haver um parâmetro para sua utilização, foram seguidas as recomendações do fabricante.

### **3.2.5. Água de amassamento**

A água de amassamento utilizada para a composição das misturas propostas foi a água normalmente fornecida por meio da rede de abastecimento de água do município.

## **3.3. Métodos de ensaio**

Neste subcapítulo, são brevemente apresentados os métodos de ensaio empregados para a realização dos ajustes das formulações propostas, bem como para a avaliação de suas propriedades no estado fresco, de modo a alcançar os objetivos pretendidos na pesquisa.

### 3.3.1. Estudo de dosagem piloto

Para a definição da ordem e do tempo de mistura dos materiais foi realizado um estudo piloto em laboratório, partindo inicialmente do emprego do procedimento sugerido no trabalho de Souza et al. (2012), visto que o traço base utilizado na presente pesquisa foi um dentre os propostos por estes autores. Vale observar que, para a mistura mecanizada dos materiais, fez-se uso de um misturador de eixo vertical, com velocidade de rotação de até 3.000 rpm (rotações por minutos), empregado em sua velocidade mais baixa, da ordem de 180 a 460 rpm.

A Figura 3.7 apresenta resumidamente o procedimento final adotado para a preparação das argamassas, especialmente daquelas sem agregado reciclado. A princípio, procedeu-se com a homogeneização manual dos materiais secos, em questão o cimento, a sílica ativa e o agregado miúdo (areia). Feito isto, foi adicionada a água de amassamento à mistura, de uma única vez, exceto sua porção utilizada para a dissolução dos aditivos (6 %). Por fim, foram acrescentados os aditivos, dissolvidos em parte da água do traço. Dentre os tipos de aditivo, foi primeiramente colocado o aditivo superplastificante (SP), com o intuito de dispersar as partículas, e apenas então inserido na composição o aditivo modificador de viscosidade (MV), objetivando o alcance da coesão e da homogeneidade desejadas para a mistura.

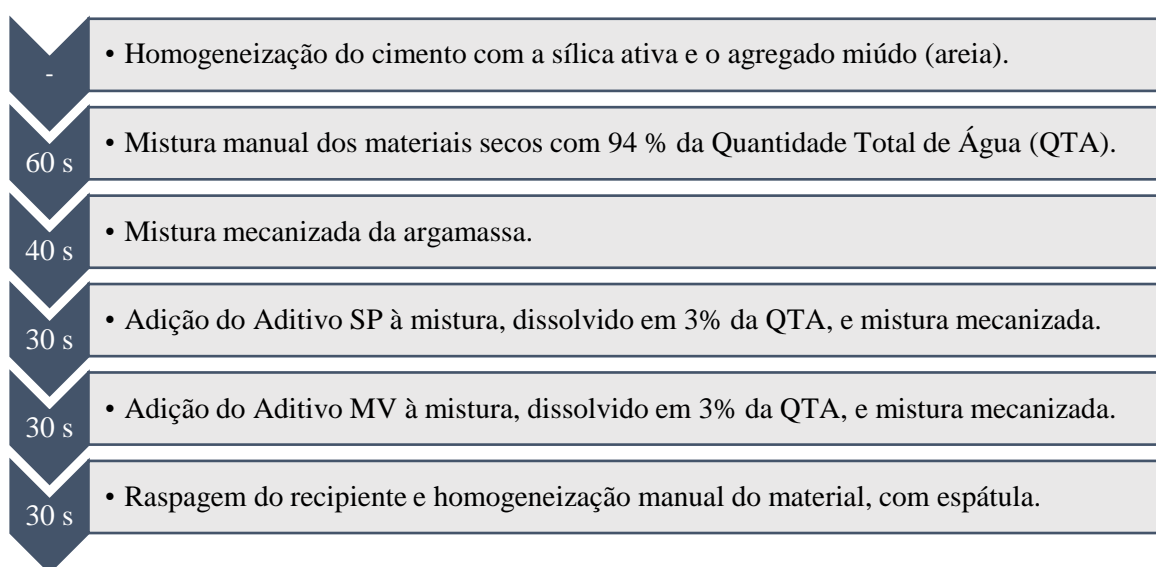


Figura 3.7 – Procedimento de mistura adotado para a preparação das argamassas com AMN e sem AMRC (Fonte: a autora).

O traço base das formulações propostas neste estudo que, conforme citado, foi o mesmo para todas as misturas, especialmente no que tange à quantidade de cimento, agregado miúdo e sílica ativa, teve como referencial a proporção que apresentou os resultados mais satisfatórios dentre as avaliadas por Souza et al. (2012), a qual foi também utilizada por Silva (2016) em seu trabalho, mostrada na Tabela 3.7. Vale ressaltar que existiram duas motivações principais para a não realização de um estudo próprio de dosagem no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, sendo elas: o fato deste não ser o foco da pesquisa, centrada na avaliação da incorporação de agregados reciclados na composição de argamassas autonivelantes; e o reduzido tempo disponível para a execução do programa experimental.

Tabela 3.7 – Traço unitário, em massa, proposto por Souza et al. (2012) e utilizado como traço base da presente pesquisa.

| <b>Material</b>                | Cimento | Areia Seca | Sílica Ativa | Super-plastificante | Modificador de Viscosidade | Água / materiais secos (a/ms) |
|--------------------------------|---------|------------|--------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| <b>Proporção em massa (kg)</b> | 1       | 1,25       | 0,05         | 0,004               | 0,0077                     | 0,236                         |

Fonte: a autora.

Nos traços em que houve a incorporação do agregado reciclado ou a utilização de aditivo polifuncional (PP), o procedimento apresentado na Figura 3.7 passou por algumas alterações. Por exemplo, no caso do emprego de agregado reciclado, devido a necessidade de realização de uma pré-saturação deste (como será melhor descrito na sequência), seu acréscimo à mistura foi deixado enquanto último passo, logo após a adição dos aditivos e sua completa homogeneização, sendo ele misturado manualmente por 15 segundos e mecanicamente por mais 30 segundos. Quando utilizado o aditivo PP, por sua vez, como se trata de um único aditivo, com função dupla, sua adição à mistura foi realizada em um único tempo, estando ele dissolvido em apenas 3 % da quantidade total de água do traço.

O processo de pré-molhagem, ou pré-saturação do agregado reciclado utilizado nas formulações propostas foi iniciado 10 minutos antes do início da mistura dos materiais, mesmo tempo adotado por Leite (2001). Este procedimento foi feito com uso de spray, visando a melhor distribuição da água entre os grãos do resíduo. Após ele, o recipiente em que o material umectado estava disposto foi coberto com pano levemente molhado, de modo a conservar sua umidade.



Para o cálculo da quantidade de água empregada na pré-molhagem, realizado por meio da Equação 3.1, foi considerada uma taxa de compensação da absorção de água do agregado de 70 %, teor semelhante ao utilizado por Carrijo (2005), Angulo (2005) e Machado et al. (2018).

$$A_{pm} = T_{ca} \cdot T_{aa} \cdot m_{arc} \quad (3.1)$$

Sendo:

- $A_{pm}$  – quantidade de água para a pré-molhagem (g);
- $T_{ca}$  – taxa de compensação da absorção de água do agregado (%);
- $T_{aa}$  – taxa de absorção do agregado (%);
- $m_{arc}$  – massa de agregado reciclado compensada (g).

A massa de agregado reciclado compensada ( $m_{arc}$ ), citada na Equação 3.1, pode ser calculada conforme a Equação 3.2, proposta por Leite (2001). A massa específica do agregado reciclado é menor, se comparada a massa específica do agregado natural, como mencionado anteriormente, fazendo-se por isso necessária uma compensação, em volume, entre as massas destes dois agregados, antes da incorporação do AMRC na mistura.

$$m_{arc} = m_{amn} \cdot \frac{\gamma_{amr}}{\gamma_{amn}} \quad (3.2)$$

Sendo:

- $m_{amn}$  – massa de agregado miúdo natural (g);
- $\gamma_{amr}$  – massa específica do agregado miúdo reciclado (g/cm<sup>3</sup>);
- $\gamma_{amn}$  – massa específica do agregado miúdo natural (g/cm<sup>3</sup>).

É importante destacar ainda que a quantidade de água para a pré-molhagem, calculada para cada teor de agregado reciclado utilizado, foi descontada da água de amassamento das misturas, não acrescida a ela. Logo, o fator água / cimento (a/c) foi mantido em todas as formulações.

### **3.3.2. Ajuste das formulações propostas - Ensaios de consistência e de tempo de fluxo**

É fato que os materiais empregados nesta pesquisa, desenvolvida no estado do Pará, dificilmente seriam os mesmos daqueles aplicados por Souza et al. (2012), no Paraná, que primeiro elaboraram o traço base deste estudo. Por isso, já era esperado, desde a produção do traço de referência com aditivos combinados (REF-C), igual ao traço base, que se fizesse necessário realizar ajustes.

Os referidos ajustes tinham por objetivo a manutenção da viscosidade e da coesão das argamassas produzidas, ou seja, eles eram realizados com o intuito de evitar que a diferença entre os materiais utilizados no trabalho de Souza et al. (2012) e na presente pesquisa para a elaboração do traço base conduzisse a espalhamentos excessivos, ou reduzidos demais, bem como à segregação e à exsudação das misturas.

Cada formulação passou por ajustes individuais, realizados apenas por meio da variação de seu teor de aditivo. O aditivo que tinha sua proporção alterada era o SP, no caso dos traços com aditivos combinados, e o PP, nos traços com aditivo específico. Não houve, para o ajuste de nenhuma das formulações, qualquer mudança nas proporções de cimento, de agregado miúdo ou de sílica ativa previstas no traço base, nem no fator água cimento deste.

Os ajustes realizados foram acompanhados pelos ensaios de consistência (mini slump-test) e de tempo de fluxo (mini funil-V), cuja aplicação é prevista pela EFNARC (2002), bem como por avaliações visuais das misturas pós-espalhamento, seguindo as indicações de Martins (2009), apresentadas no subcapítulo 2.1.2 deste trabalho. Esses dois ensaios consistem, basicamente, na introdução da argamassa produzida, após sua completa mistura, em seus respectivos equipamentos, liberando posteriormente o espalhamento desta, seja pela elevação cuidadosa do mini slump ou pela desobstrução do fluxo do mini funil-V. Ambos foram empregados como parâmetro de controle para a adequada elaboração das formulações.

A EFNARC (2002) prevê enquanto intervalo aceitável para o resultado de espalhamento de argamassas autonivelantes, obtido em ensaio com mini-slump, de 240 a 260 mm. Para o ensaio de tempo de fluxo, por sua vez, ela indica como coerente, para este mesmo tipo de argamassa, valores entre 7 e 11 s. No decorrer da realização destes ensaios, se os resultados se mostravam abaixo dos limites inferiores apresentados, aditivos eram acrescentados à mistura, em um novo teste. Por outro lado, se estes mesmos resultados se

mostrassem superiores aos limites citados, as quantidades de aditivos nos traços eram reduzidas, também em um novo teste, refazendo completamente a mistura.

A Figura 3.8, disposta na sequência, apresenta desenhos esquemáticos do mini slump e do mini funil-V, com suas respectivas dimensões, recomendadas pela EFNARC (2002). Já a Figura 3.9 ilustra o emprego destes equipamentos no laboratório, durante a realização dos ensaios de consistência e de tempo de fluxo.

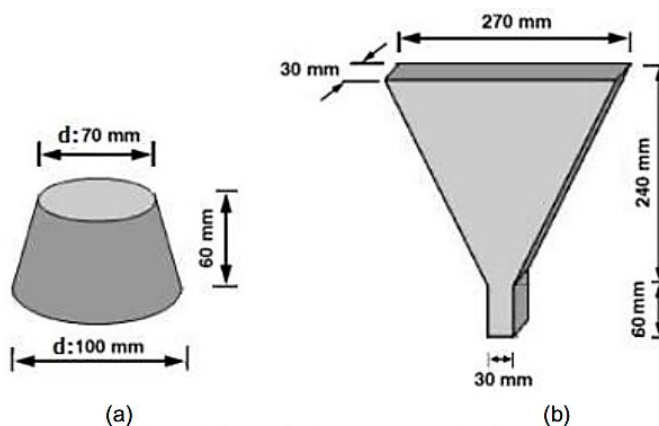


Figura 3.8 – Equipamentos empregados nos ensaios de consistência e de tempo de fluxo e suas respectivas dimensões, sendo: a) mini slump-test; e b) mini funil-V (EFNARC, 2002).



Figura 3.9 – Momento dos ensaios com mini-slump, à esquerda, e com mini funil-V, à direita (Fonte: a autora).

A avaliação visual, como citado, considerou as premissas de Martins (2009), principalmente no que tange à observação das condições das bordas das argamassas formuladas após seu espalhamento com mini slump, de modo a verificar se estas se encontravam lisas, altas e bem definidas, indicando a ausência de exsudação. Além disso,

foi também observada a eventual aglomeração de sólidos na argamassa, o que indicaria a segregação da mistura. Visto que, como citado pela EFNARC (2002), em casos severos de segregação, a maior parte dos agregados se acumula no centro do material espalhado, facilitando a identificação da ocorrência deste fenômeno.

Após realizados os devidos ajustes nas formulações propostas, os ensaios empregados para a avaliação de suas propriedades no estado fresco foram: o de tempo de cura, que utilizou as prescrições da ASTM C1708 (ASTM, 2017); o de exsudação, executado a partir de uma adaptação da NBR 15.558 (ABNT, 2008); e o de determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, para o qual se fez uso da NBR 13.278 (ABNT, 2005). O detalhamento dos procedimentos adotados em cada um deles encontra-se apresentado na sequência.

### **3.3.3. Avaliação do efeito da incorporação de AMRC nas propriedades das argamassas autonivelantes no estado fresco**

#### **3.3.3.1. Ensaio de exsudação**

O ensaio de exsudação foi empregado na pesquisa com o intuito de identificar possíveis alterações nas taxas de exsudação das misturas, devido às diferentes proporções de incorporação de agregado reciclado nelas empregadas. Para a realização deste ensaio foram observadas as indicações da NBR 15.558 (ABNT, 2008). No entanto, considerando que esta é uma norma específica para concreto, no decorrer da execução do ensaio algumas adaptações se fizeram necessárias. As adaptações realizadas neste trabalho perante às prescrições normativas foram as mesmas adotadas por Rubin (2015) em sua pesquisa, autora que também aplicou esta norma para a observação da ocorrência de exsudação em argamassas autonivelantes.

A primeira adaptação proposta por Rubin (2015) para as indicações da NBR 15.558 (ABNT, 2008) foi a redução das dimensões do molde, uma vez que o material a ser analisado era uma argamassa, não um concreto. Esta autora empregou, ao invés de recipientes cilíndricos com diâmetro interno de 254 +/- 6 mm e altura interna de 279 +/- 6 mm, recipientes de PVC, com diâmetro interno e altura interna de aproximadamente 100 mm e 109 mm, respectivamente.

Outras adaptações utilizadas na presente pesquisa, também aplicadas por Rubin (2015), foram o método de adensamento do material nos moldes, não realizado,

considerando que argamassas autonivelantes dispensam adensamento; e a adoção de um tempo para realização de leituras de 1:30h, visto que após este período o material já começava a alterar seu estado físico.

Para o ensaio, os moldes foram preenchidos com a argamassa produzida e cobertos com filme plástico, evitando perdas de água para o ambiente, como mostra a Figura 3.10. Feito isto, a cada 10 min, durante todo o tempo estipulado para a realização das leituras, a água exsudada era recolhida, com o auxílio de um conta-gotas, e pesada.



Figura 3.10 – Ensaio de exsudação da argamassa formulada (Fonte: a autora).

A seguir, as Equações 3.3, 3.4 e 3.5 mostram, respectivamente, os cálculos recomendados pela NBR 15.558 (ABNT, 2008) e empregados para a definição: do volume de água exsudada por área unitária de superfície ( $V$ ), da massa de água da amostra ( $m_{ar}$ ) e da quantidade de água exsudada ( $E$ ). Todos eles foram utilizados para a determinação destes parâmetros para cada um dos oito traços propostos.

$$V = \frac{V_1}{A} \quad (3.3)$$

$$m_{ar} = m_e \cdot \frac{m_{am}}{m_t} \quad (3.4)$$

$$E = \frac{m_{ae}}{m_{ar}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Sendo:

- $V$  – volume de água exsudada por área unitária de superfície ( $\text{mL}/\text{cm}^2$ );
- $V_1$  – volume de água exsudada no intervalo de tempo selecionado ( $\text{mL}$ );

- A – área exposta da argamassa do recipiente (cm<sup>2</sup>);
- m<sub>ar</sub> – massa de água da argamassa do recipiente (g);
- m<sub>e</sub> – massa da amostra ensaiada (g);
- m<sub>am</sub> – massa da água de amassamento do traço, descontada a absorção dos agregados (g);
- m<sub>t</sub> – massa total do traço (g);
- m<sub>ae</sub> – massa de água exsudada da amostra (g);
- E – quantidade de água exsudada (%).

### 3.3.3.2. Determinação do tempo de cura

A determinação do tempo de cura (healing time) foi realizada observando-se as prescrições da ASTM C1708 (ASTM, 2017), com o intuito de verificar a influência da incorporação do AMRC no tempo de cura das argamassas autonivelantes com ele produzidas, ou seja, para observar se a substituição da areia natural pelo agregado reciclado aceleraria, retardaria ou simplesmente manteria o tempo de cura das argamassas com resíduo, em relação ao traço de referência.

Para a execução do ensaio, realizado apenas uma vez com cada traço formulado, uma bandeja metálica era inicialmente preenchida com a argamassa produzida, após sua completa mistura, até uma espessura de 6 +/- 1 mm. Feito isto, cortes eram aplicados no material ainda fresco, com um ângulo de 45° em relação à bandeja, fazendo uso de uma barra metálica de 6 mm de espessura, até o fundo do recipiente.

O primeiro corte era realizado no décimo minuto, contado a partir do tempo inicial de mistura entre os materiais secos e a água de molhagem do traço. Depois deste, novos cortes eram realizados a cada 5 minutos, até que a argamassa iniciasse seu processo de endurecimento, não sendo assim capaz de fechar os cortes produzidos.

Os cortes distavam entre si e das bordas da bandeja em aproximadamente 25 mm e eram feitos em sentido ortogonal a maior dimensão do recipiente, como mostra a Figura 3.11. Nas bandejas utilizadas para o ensaio, os tempos de ensaio eram marcados na margem inferior e o traço em análise na margem superior.

O tempo de cura propriamente dito apenas era determinado após a passagem de uma noite da realização do ensaio, visto que somente no dia seguinte se fazia possível observar melhor os cortes executados, notando entre eles qual foi o último no qual nenhuma

ranhura óbvia podia ser observada, ou seja, o último a se fechar completamente. O tempo de cura da argamassa formulada é o tempo equivalente ao referido corte.

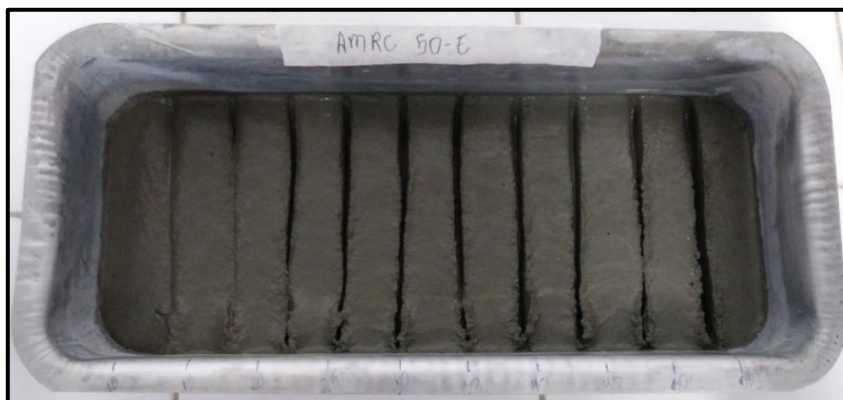


Figura 3.11 – Ensaio de tempo de cura (Fonte: a autora).

### 3.3.3.3. Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado

Ainda no estado fresco, as formulações propostas tiveram também determinadas sua densidade de massa e seu teor de ar incorporado, calculados conforme as recomendações da NBR 13.278 (ABNT, 2005), fazendo uso das Equações 3.6 e 3.7, respectivamente. O molde empregado neste ensaio foi o mesmo utilizado no ensaio de exsudação e o adensamento sugerido na norma foi dispensado, visto que o material em análise é uma argamassa autonivelante.

$$A = \frac{M_C - M_V}{V_r} \cdot 100 \quad (3.6)$$

$$AI = \left(1 - \frac{A}{B}\right) \cdot 100 \quad (3.7)$$

Sendo:

- A – densidade de massa da argamassa (g/cm<sup>3</sup>);
- M<sub>C</sub> – massa do recipiente cilíndrico de PVC com a argamassa de ensaio (g);
- M<sub>V</sub> – massa do recipiente cilíndrico de PVC vazio (g);
- V<sub>r</sub> – volume do recipiente cilíndrico de PVC (cm<sup>3</sup>);
- AI – teor de ar incorporado na argamassa (%);
- B – densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios (g/cm<sup>3</sup>).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo deste capítulo estão apresentados os resultados obtidos por meio da execução do programa experimental, bem como uma breve discussão acerca de seus produtos e da relação que possuem com as variáveis da pesquisa, em questão o teor de agregado reciclado utilizado e a combinação de aditivos empregada nas argamassas autonivelantes formuladas.

Inicialmente, serão mostrados na sequência os ajustes que se fizeram necessários para que as argamassas apresentassem a característica de autonivelamento e se enquadrassem dentre os limites de espalhamento e de tempo de fluxo recomendados pela EFNARC (2002). Feito isto, serão indicados os resultados dos ensaios realizados para a caracterização das argamassas produzidas no estado fresco.

### 4.1. Formulações de argamassas autonivelantes produzidas

A Tabela 4.1 mostra a descrição dos traços finais das argamassas formuladas, após realizados os devidos ajustes em seus teores de aditivos, tanto para que seu espalhamento e tempo de fluxo estivessem dentro dos limites mínimo e máximo prescritos pela EFNARC (2002), quanto para que apresentassem uma configuração visual que não indicasse a ocorrência de exsudação ou de segregação da mistura. Na referida tabela, encontram-se sombreadas as proporções que diferem das empregadas no traço base, proposto por Souza et al. (2012), seja devido aos ajustes realizados ou a própria incorporação do AMRC.

Tabela 4.1 – Descrição dos traços unitários finais, em massa, das argamassas formuladas.











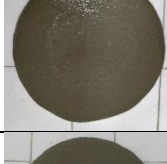


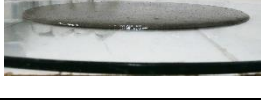


| Traço      | Cimento | AMN    | AMRC   | Sílica | Aditivo SP | Aditivo MV | Aditivo PP | Água para a mistura | Água para a pré-molhagem |
|------------|---------|--------|--------|--------|------------|------------|------------|---------------------|--------------------------|
| REF - C    | 1,0000  | 1,2500 | -      | 0,0500 | 0,0050     | 0,0077     | -          | 0,5428              | -                        |
| REF - E    | 1,0000  | 1,2500 | -      | 0,0500 | -          | -          | 0,0095     | 0,5428              | -                        |
| AMRC25 - C | 1,0000  | 0,9375 | 0,2557 | 0,0500 | 0,0030     | 0,0077     | -          | 0,5052              | 0,0376                   |
| AMRC25 - E | 1,0000  | 0,9375 | 0,2557 | 0,0500 | -          | -          | 0,0083     | 0,5052              | 0,0376                   |
| AMRC50 - C | 1,0000  | 0,6250 | 0,5113 | 0,0500 | 0,0040     | 0,0077     | -          | 0,4676              | 0,0752                   |
| AMRC50 - E | 1,0000  | 0,6250 | 0,5113 | 0,0500 | -          | -          | 0,0087     | 0,4676              | 0,0752                   |
| AMRC75 - C | 1,0000  | 0,3125 | 0,7670 | 0,0500 | 0,0040     | 0,0077     | -          | 0,4301              | 0,1127                   |
| AMRC75 - E | 1,0000  | 0,3125 | 0,7670 | 0,0500 | -          | -          | 0,0087     | 0,4301              | 0,1127                   |

Fonte: a autora.



A Tabela 4.2 exibe os resultados de espalhamento e de tempo de fluxo obtidos para cada traço, bem como suas respectivas configurações visuais, sob um ponto de vista superior e lateral.

Tabela 4.2 – Espalhamento médio (Em), tempo de fluxo e configuração visual obtidos para as argamassas produzidas após o ajuste dos traços.

| Traço      | Teor de AMRC (%) | Aditivo ajustado - Teor final (%) | Em (cm) * | Tempo de fluxo (s) ** | Configuração visual da argamassa produzida   |   |
|------------|------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------|--|---|
|            |                  |                                   |           |                       | Vista superior   | Vista lateral   |
| REF - C    | 0,00             | SP - 0,50                         | 25,05     | 7,42                  |    |    |
| REF - E    | 0,00             | PP - 0,95                         | 24,60     | 7,24                  |    |    |
| AMRC25 - C | 25,00            | SP - 0,30                         | 24,40     | 8,15                  |   |   |
| AMRC25 - E | 25,00            | PP - 0,83                         | 25,35     | 7,51                  |  |  |
| AMRC50 - C | 50,00            | SP - 0,40                         | 25,95     | 7,04                  |  |  |
| AMRC50 - E | 50,00            | PP - 0,87                         | 25,90     | 7,98                  |  |  |
| AMRC75 - C | 75,00            | SP - 0,40                         | 24,90     | 7,23                  |  |  |
| AMRC75 - E | 75,00            | PP - 0,87                         | 24,25     | 7,83                  |  |  |

\* Espalhamento médio (Em) recomendado pela EFNARC (2002): 24 a 26 cm.

\*\* Tempo de fluxo recomendado pela EFNARC (2002): 7 a 11 s.

Fonte: a autora.

O traço REF-C, como citado no programa experimental, possuía à princípio a mesma proporção de materiais utilizada em um dos traços de melhor desempenho dentre os estudados por Souza et al. (2012) em sua pesquisa. Ainda que o referido trabalho tenha sido desenvolvido no estado do Paraná, com os materiais disponíveis nesta localidade, enquanto a presente pesquisa foi realizada no estado do Pará, com materiais diferentes destes últimos, logo na primeira tentativa de produção o traço destes autores mostrou excelentes características, apresentando autonivelamento, estabilidade (não houve segregação ou exsudação) e um espalhamento da ordem de 23,5 cm, apenas 0,5 cm abaixo do limite inferior recomendado pela EFNARC (2002).

Assim sendo, a única alteração realizada no traço base, aqui denominado de REF-C, foi o aumento de 0,1 % da quantidade do aditivo superplastificante (SP) empregada, totalizando 0,5 % do mesmo utilizado no referido traço (teores em relação a massa de cimento). Feito este ajuste, como mostrado na Tabela 4.2, REF-C alcançou um espalhamento médio (Em) e um tempo de fluxo dentro dos limites da normalização europeia, bem como uma configuração lisa, com bordas altas e uniformes, como desejado para uma argamassa autonivelante.

O traço REF-E foi o primeiro dentre os propostos nesta pesquisa a empregar, ao invés da corriqueira combinação de aditivo modificador de viscosidade (MV) e aditivo superplastificante (SP), um aditivo específico para argamassa autonivelante, mais especificamente um aditivo plastificante polifuncional (PP). Sendo este o traço pioneiro no estudo a utilizá-lo, optou-se por partir para a sua formulação do emprego de 0,8 % de PP, um valor médio em relação a proporção recomendada pelo fabricante para o uso do material. Como com este teor não foram alcançados o espalhamento e o tempo de fluxo desejados, também foram realizados testes com 0,9 % e 1,0 % de PP, sendo que este último excedeu o limite máximo proposto para os ensaios pela EFNARC (2002). Por fim, fez-se um teste com 0,95 % de PP, teor este que se mostrou adequado em todos os parâmetros analisados naquele momento, como pode ser notado através da observação dos valores e imagens apresentados na Tabela 4.2 para o traço REF-E.

O traço AMRC25-C, por sua vez, foi o primeiro a utilizar Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC) em sua composição, em um teor de substituição de apenas 25 %, compensado em relação ao volume de areia empregado no traço base. Em todos os traços com agregado reciclado, a começar deste, foi realizada a pré-molhagem do resíduo, pelo menos 10 minutos antes da mistura dos materiais, com a quantidade de água especificada na Tabela 4.1. Para ele, foi inicialmente testado um teor de SP de 0,5 %, o

mesmo que se mostrou adequado para REF-C. Como, neste caso, o espalhamento com o referido teor de aditivo excedeu o limite máximo da EFNARC (2002), foram também verificados os teores de 0,4 % e 0,3 %. Este último foi considerado o teor final, uma vez que permitiu o alcance de um espalhamento e de um tempo de fluxo adequados (dentro dos limites normativos), bem como a obtenção de uma argamassa com configuração visual satisfatória, considerando as premissas apontadas por Martins (2009).

No traço AMRC25-E, com 25 % de agregado reciclado e aditivo específico, foi primeiro testado o teor de 0,8 % de PP, assim como feito para REF-E. No entanto, este teor resultou em um espalhamento abaixo do limite inferior presente na recomendação europeia, e o teor de 0,85 % de PP, testado na sequência, em um espalhamento acima do limite superior sugerido pela mesma norma. Assim, foi realizada uma tentativa com 0,83 % de PP, a qual apresentou resultados adequados, como mostrado na Tabela 4.2, com 25,35 cm de espalhamento, 7,51 s de tempo de fluxo e uma configuração visual satisfatória, com bordas lisas, uniformes e altas.

Para o traço AMRC50-C foram realizadas apenas duas tentativas, uma com 0,35 % e outra com 0,40 % de SP. Dentre estas, a que apresentou melhores resultados foi a com 0,40 % de SP, permitindo a obtenção de uma argamassa autonivelante com espalhamento e tempo de fluxo dentro dos limites estabelecidos pela EFNARC (2002) e com uma boa configuração visual. O traço AMRC50-E, do mesmo modo, passou por apenas dois testes, um com 0,85 % e outro com 0,87 % de PP. O que se mostrou mais satisfatório dentre estes foi aquele realizado com 0,87 % de PP, cujos resultados estão na Tabela 4.2.

O traço AMRC75-C obteve bons resultados já na primeira tentativa, com 0,4 % de SP, mesmo teor de aditivo empregado para AMRC50-C. Notou-se que, apesar do aumento da quantidade de agregado reciclado empregado neste traço, seu espalhamento e tempo de fluxo se mostraram adequados perante aos parâmetros normativos com semelhante quantidade de aditivo na mistura. O traço AMRC75-E, por sua vez, passou por dois testes, os mesmos utilizados para AMRC50-E (com 0,85 % e 0,87 % de PP), apresentando melhor resultado também com o uso de 0,87 % de PP.

A Figura 4.1, a seguir, ilustra a variação do teor final de aditivo para cada traço, após realizados os devidos ajustes em suas formulações. Observa-se por meio dele que, ainda que o AMRC empregado possua um módulo de finura um pouco menor que o do AMN, sendo, portanto, mais fino, além de mais poroso, seu uso não levou à utilização de um teor superior de aditivo para o alcance da consistência desejada para a mistura. Ao invés disso, na verdade, pode-se notar que os maiores teores de aditivo, tanto superplastificante (SP)

quanto polifuncional (PP), foram empregados nos traços de referência, sem agregado reciclado, contrariando a tendência recorrente, citada por Solyman (2005) e disposta no capítulo 2.2.1 deste trabalho.

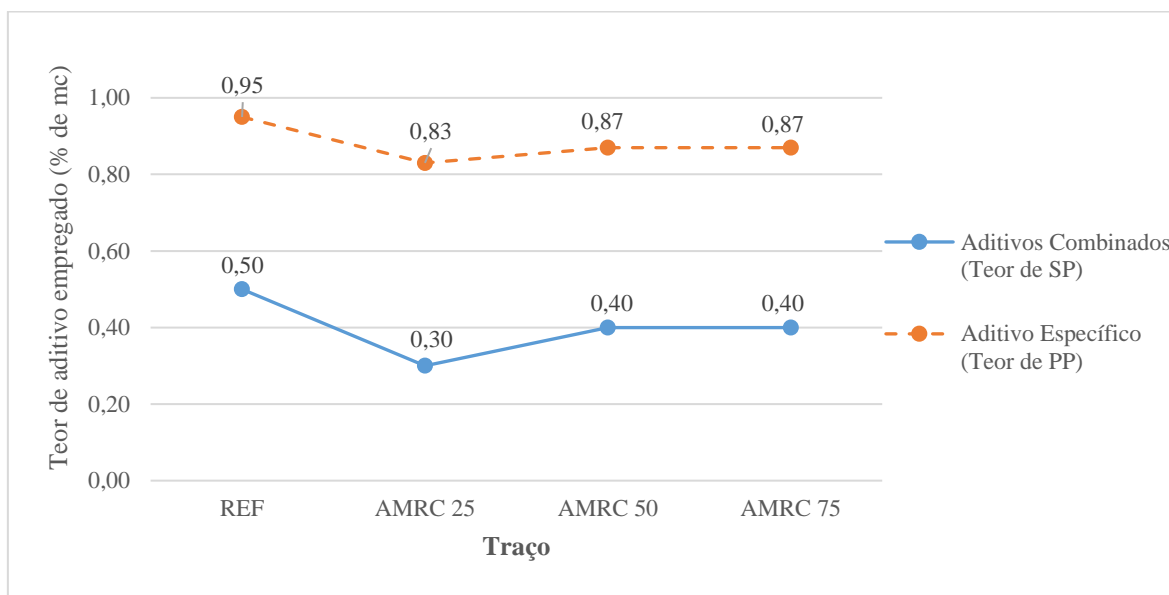


Figura 4.1 – Teor de aditivo final empregado em cada uma das formulações propostas (Fonte: a autora).

Este fato pode ser atribuído à eficácia do processo de pré-molhagem, realizado conforme sugerido por Leite (2001), o qual preparou adequadamente o AMRC, auxiliando na manutenção da reologia das argamassas produzidas e impedindo que o resíduo viesse a sequestrar precocemente a água da mistura. Além disso, deve ser também considerado que a compensação entre os traços foi em volume, não em massa. Logo, as massas de agregados miúdos empregadas em misturas com agregado reciclado foram menores, uma vez que a massa específica deste material é menor. Portanto, existem nestas misturas um teor mais baixo de finos disponível, o que reduz a necessidade de aditivos, neste caso, para a manutenção da consistência adequada da argamassa autonivelante.

A Figura 4.1 mostra também uma significativa diferença entre os teores de aditivos empregados nos traços com aditivos combinados e naqueles com aditivo específico. No entanto, deve-se atentar que o teor mostrado no gráfico para a série com aditivos combinados (C) se refere apenas ao aditivo superplastificante (SP), desconsiderando o teor de aditivo modificador de viscosidade (MV), o qual manteve-se fixo em todos os traços desta série. Logo, a comparação a ser realizada por meio da Figura 4.1 é apenas entre os traços com e sem agregado reciclado, bem como entre os diferentes teores de incorporação deste resíduo,

para uma mesma combinação de aditivos. Observa-se, de modo geral, que não houve grandes modificações nos teores de aditivos utilizados entre os traços propostos, variando em até 0,2 % para os traços com SP e 0,12 % para aqueles com PP.

## 4.2. Avaliação do efeito da incorporação de AMRC nas propriedades das argamassas autonivelantes no estado fresco

As Figuras 4.2 e 4.3, dispostas na sequência, apresentam as massas acumuladas, em gramas, de água exsudada no decorrer dos 90 minutos do ensaio de exsudação, para os traços com aditivos combinados e com aditivo específico, respectivamente. Nela, os diferentes tipos de traço e cores de linha representam formulações distintas.

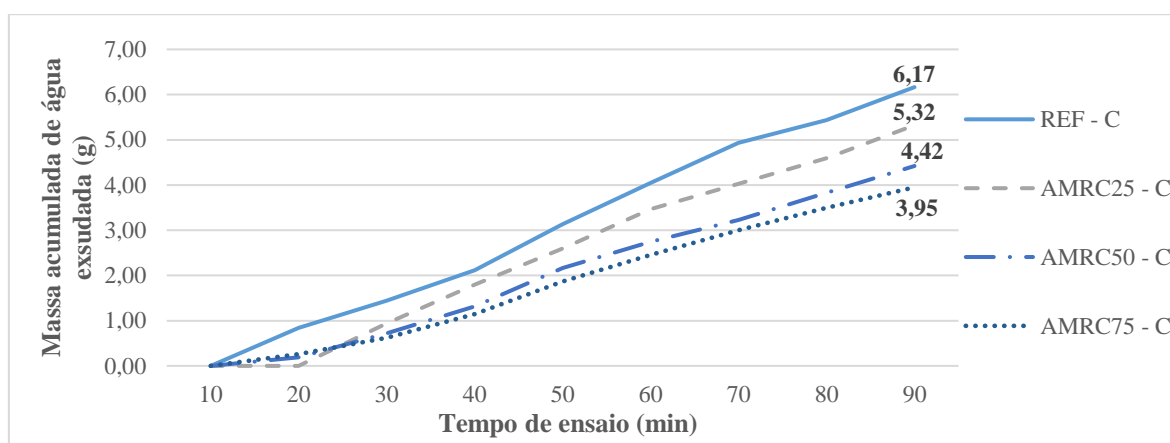


Figura 4.2 – Massa acumulada de água exsudada ao longo dos 90 minutos de ensaio, para os traços com aditivos combinados (Fonte: a autora).

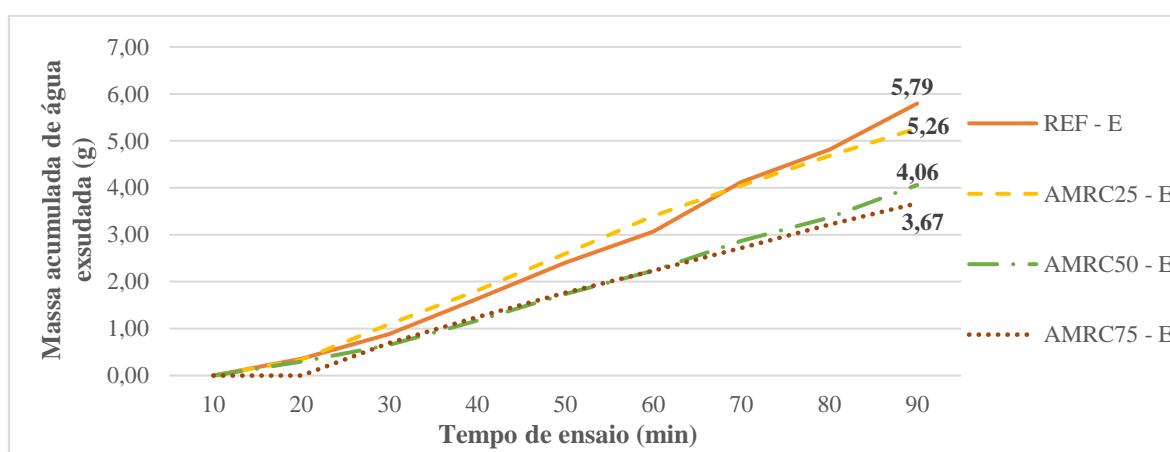


Figura 4.3 – Massa acumulada de água exsudada ao longo dos 90 minutos de ensaio, para os traços com aditivo específico (Fonte: a autora).

Pela observação das Figuras 4.2 e 4.3 pode-se notar que o traço AMRC75-E, dentre todos, foi aquele que exsudou uma menor quantidade de água (3,67 g) e que o traço REF-C, por outro lado, foi o que apresentou uma maior massa de água exsudada (6,17 g). Além disso, é possível nelas verificar que os traços foram demonstrando uma menor perda precoce de água quanto maior o teor de agregado reciclado.

A referida ocorrência pode ser associada à elevada absorção do agregado reciclado, que, por absorver a água disponível na mistura em que está incorporado com maior facilidade do que um agregado natural faria, deixa uma menor quantidade de água livre para exsudar. Além disso, deve ser considerado o processo de pré-saturação destes agregados, o qual acaba por também reduzir a proporção de água livre na mistura final, ao consumi-la previamente para a molhagem dos mesmos.

A massa de água exsudada durante o ensaio realizado, apresentada a pouco, é dado essencial para a obtenção da “quantidade de água exsudada”, um percentual que indica quanto a massa de água perdida representa em relação ao total de água presente na amostra ensaiada, calculado conforme recomendação da NBR 15.558 (ABNT, 2008). A Tabela 4.3, a seguir, mostra os dados utilizados para o referido cálculo, incluindo desde dados teóricos do traço, como sua massa total e quantidade de água (descontando o que teoricamente será absorvido pelos agregados presentes na formulação), até informações obtidas no decorrer da realização do ensaio. Nela, encontram-se sombreados os resultados dos traços com aditivos combinados, para uma melhor diferenciação entre estes e os dos traços com aditivo específico.

Tabela 4.3 – Dados resultantes do ensaio de exsudação.

| <b>Traço</b> | <b>Massa total do traço (g)</b> | <b>Massa de água no traço (g) *</b> | <b>Massa de argamassa ensaiada (g)</b> | <b>Massa de água da argamassa ensaiada (g)</b> | <b>Massa de água exsudada durante o ensaio (g)</b> | <b>Quantidade de água exsudada (%)</b> |
|--------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|--|--|--|
| REF - C      | 3569,38                         | 651,00                              | 1295,15                                | 236,22   | 6,17   | <b>2,61</b>                            |
| REF - E      | 3565,38                         | 651,00                              | 1312,28                                | 239,61   | 5,79   | <b>2,42</b>                            |
| AMRC25 - C   | 3495,82                         | 590,77                              | 1289,61                                | 217,93   | 5,32   | <b>2,44</b>                            |
| AMRC25 - E   | 3492,82                         | 590,77                              | 1302,70                                | 220,34   | 5,26   | <b>2,39</b>                            |
| AMRC50 - C   | 3426,03                         | 530,53                              | 1280,79                                | 198,33   | 4,42   | <b>2,23</b>                            |
| AMRC50 - E   | 3422,28                         | 530,53                              | 1275,55                                | 197,74   | 4,06   | <b>2,05</b>                            |
| AMRC75 - C   | 3354,97                         | 470,29                              | 1255,77                                | 176,03   | 3,95   | <b>2,24</b>                            |
| AMRC75 - E   | 3351,22                         | 470,29                              | 1240,90                                | 174,14   | 3,67   | <b>2,11</b>                            |

\* Massa descontando a água absorvida pelos agregados utilizados no traço.

Fonte: a autora.

Como mostra a Tabela 4.3, com a incorporação de agregado reciclado, mais leve que o natural, a massa total do traço e a massa de argamassa ensaiada sofreram uma redução gradual, ao passo que foi sendo aumentado o teor de AMRC, o qual substituiu o AMN nas misturas, em volume. A massa de água no traço, por sua vez, também foi sendo reduzida no mesmo sentido, mas, neste caso, devido à maior absorção do agregado reciclado, em relação ao agregado natural. Isto porque, para a definição do último dado citado, a absorção dos agregados utilizados, calculada em relação a massa destes no traço, foi descontada da massa total de água de amassamento presente na mistura. Vale lembrar que, como apresentado durante a caracterização dos materiais, a absorção do AMRC chega a ser quase doze vezes maior que a do AMN.

Como já ilustrado nas Figuras 4.2 e 4.3, e reiterado na Tabela 4.3, a massa de água exsudada durante o ensaio diminuiu, da mesma maneira, ao aumentar o teor de agregado reciclado. Este fato, somado a menor quantidade de água disponível na argamassa ensaiada, conduz à uma quantidade de água exsudada igualmente influenciada pelo teor de resíduo de concreto presente no traço. Isto é, a quantidade de água exsudada foi sendo reduzida ao passo que houve um acréscimo na proporção de substituição do agregado comum pelo reciclado.

É válido observar também que o AMRC, ainda que absorva rapidamente a água do meio, leva um tempo considerável para perdê-la, como notado por Leite (2001), o que corrobora com a menor exsudação encontrada para os traços que o contém. A Figura 4.4 mostra o comportamento de cada um dos traços formulados em relação a quantidade de água exsudada, sejam eles constituídos com aditivos combinados ou com o específico.

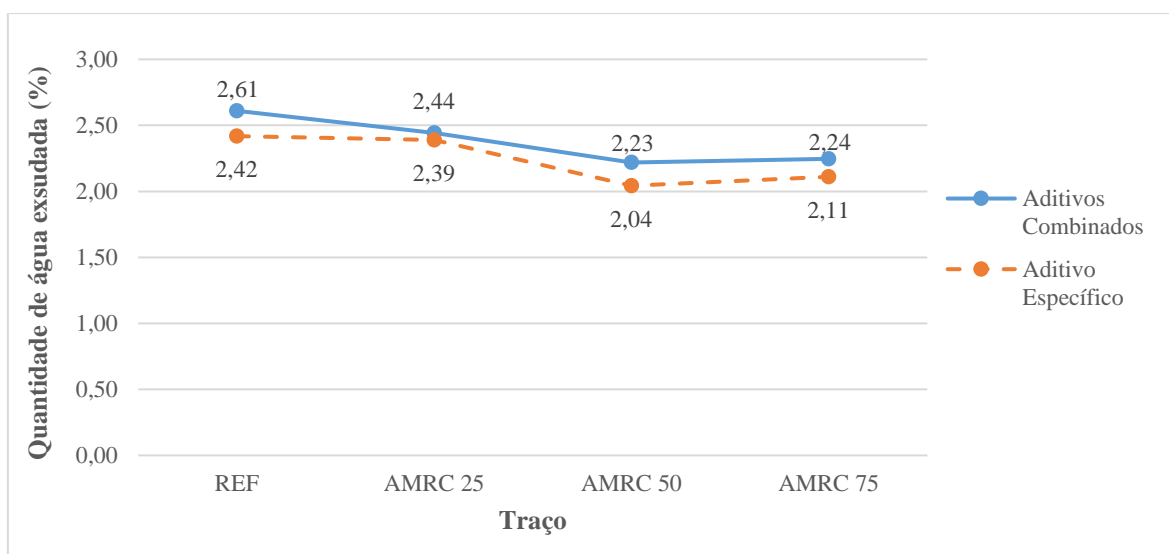


Figura 4.4 – Quantidade de água exsudada para cada traço ensaiado (Fonte: a autora).

A Figura 4.4 permite notar que, para todas as proporções de substituição de AMN por AMRC, bem como para o traço de referência, o uso do aditivo específico, em questão o plastificante polifuncional (PP), levou a menores quantidades de água exsudada, com redução em relação às formulações com aditivos combinados da ordem de 7,27 % para o traço de referência; 2,05 % para o traço com 25 % de AMRC; 8,10 % para o traço com 50 % de AMRC; e 6,22 % para o traço com 75 % de AMRC.

Quanto à comparação entre os teores de substituição, como já citado e reforçado pela apresentação da Figura 4.4, houve uma redução na quantidade de água exsudada ao passo que foi sendo aumentada a proporção de AMRC em relação a de AMN. A referida diminuição deste parâmetro pode ser associada à elevada disponibilidade de finos no agregado reciclado, bem como à sua elevada absorção, que ajudam a moderar a quantidade de água livre da mistura. Além disso, deve ser também considerado o menor uso de aditivos nos traços com resíduos, como mostrado na Figura 4.1.

Entre os traços AMRC50 e AMRC75, por outro lado, não se fez possível notar uma redução na quantidade de água exsudada, tendo a mesma se mantido praticamente semelhante. Pode-se observar que o mesmo ocorreu para os teores de aditivos destas formulações. De maneira geral, não houve uma significativa discrepância entre os valores encontrados para a quantidade de água exsudada, do menor resultado (2,04 %) para o maior (2,61 %).

Poucos autores utilizaram este ensaio para a caracterização de argamassas autonivelantes, talvez por se tratar de uma adaptação de uma norma originalmente desenvolvida para a análise de concretos. Rubin (2015), que também o empregou, obteve resultados nulos para suas formulações. Hamoy (2017), por sua vez, identificou valores para a quantidade de água exsudada entre 0,15 % e 7,20 %, aproximadamente, em ensaios com cinco traços distintos de argamassas autonivelantes. Assim, nota-se que na presente pesquisa os resultados estiveram próximos daqueles encontrados por outros autores e, ainda, que não diferiram muito entre os traços propostos.

A Tabela 4.4, disposta na sequência, apresenta os valores encontrados por meio da realização do ensaio de tempo de cura, recomendado pela norma americana ASTM C1708 (ASTM, 2017). Ela permite observar que este ensaio não ofereceu um grande subsídio para a diferenciação entre os comportamentos dos traços formulados, uma vez que todos eles apresentaram tempos de cura semelhantes.



Tabela 4.4 – Tempo de cura das argamassas formuladas.

| Traço   | Tempo de cura (min)         |                         |
|---------|-----------------------------|-------------------------|
|         | Aditivos Combinados (MV+SP) | Aditivo Específico (PP) |
| REF     | 25                          | 20                      |
| AMRC 25 | 15                          | 15                      |
| AMRC 50 | 15                          | 20                      |
| AMRC 75 | 20                          | 20                      |

Fonte: a autora.

Cichinelli (2012) cita em seu artigo, entre as características técnicas de um contrapiso autonivelante industrializado, o tempo em aberto médio da mistura, aos 20° C, de 15 a 20 minutos. Como mostrado na Tabela 4.4, os resultados encontrados para o tempo de cura na presente pesquisa, que representa o próprio tempo em aberto da mistura, estiveram entre 15 e 25 minutos, estando eles todos de acordo com o previsto pela referida autora e, no caso do traço de referência com aditivos combinados (REF-C), até acima do intervalo por ela citado, o que é vantajoso para uma obra.

A presença de agregado reciclado nos traços AMRC25, AMRC50 e AMRC75 fez com que, em misturas que empregaram aditivos combinados (MV + SP), o tempo de cura fosse menor. Logo, pode-se dizer que o AMRC reduziu o tempo em aberto das misturas, sem, no entanto, comprometê-las, ao passo que os resultados para ela encontrados foram mantidos em um intervalo de tempo normal para sua aplicação. É oportuna uma nova observação na Figura 4.1, onde se pode ver que o maior teor de aditivo SP final foi empregado justamente no traço de referência, o que também pode ter influenciado seu resultado neste ensaio.

Nos traços com incorporação de resíduo e aditivo específico (PP), por sua vez, o tempo de cura foi praticamente mantido, tendo se mostrado um pouco menor apenas para a formulação com 25 % de agregado reciclado. Na verdade, para ambas as combinações de aditivos, as misturas com 25 % de incorporação de resíduo foram as que tiveram um menor tempo de cura, fato que pode ser também atrelado as menores quantidades de aditivo empregadas nestes traços, como mostrado na Figura 4.1 e reiterado nas Figuras 4.5 e 4.6, dispostas na sequência, as quais expõem uma comparação entre os tempos de cura obtidos e os teores finais de aditivos empregados em cada formulação.

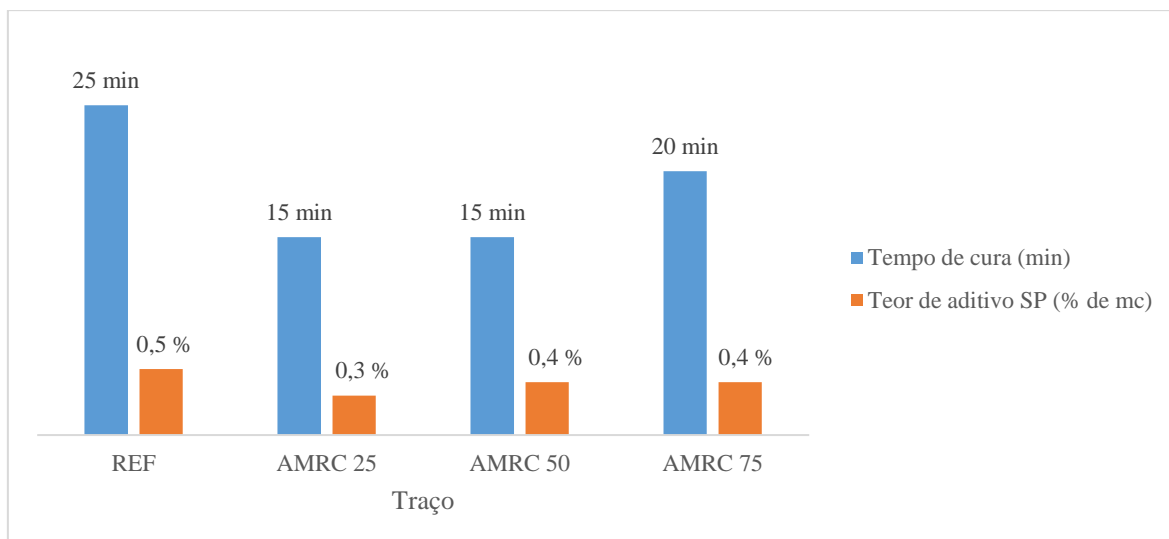


Figura 4.5 – Tempos de cura e teores finais de aditivo SP obtidos para cada traço (Fonte: a autora).

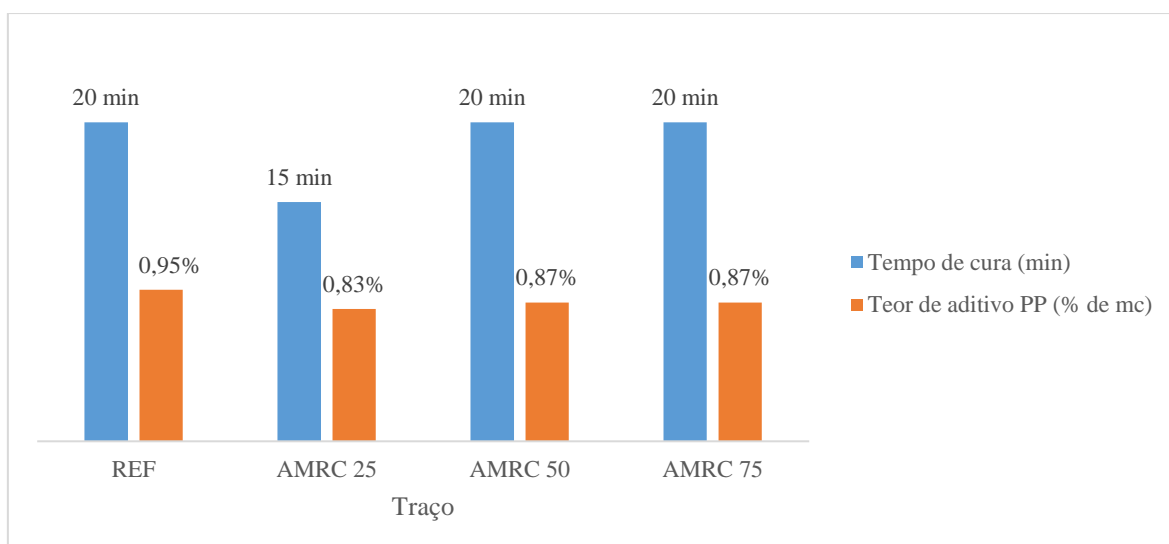


Figura 4.6 – Tempos de cura e teores finais de aditivo PP obtidos para cada traço (Fonte: a autora).

A Figura 4.7 apresenta os resultados para a densidade de massa, no estado fresco, dos oito traços formulados nesta pesquisa. Ela permite observar que houve uma gradual redução na densidade de massa das argamassas ao passo que o teor de substituição do agregado natural (AMN) pelo agregado reciclado (AMRC) foi sendo aumentado, conforme esperado.

Esta diminuição pode ser relacionada à massa específica destes materiais. Como mostrado no capítulo 3, durante a apresentação da caracterização dos agregados, o AMRC possui uma massa específica da ordem de 18,18 % menor do que a do AMN, devido principalmente à elevada porosidade deste resíduo. O fato da massa específica do agregado

reciclado empregado na mistura ser menor do que a do agregado natural, portanto, influencia diretamente na densidade de massa no estado fresco da argamassa produzida.

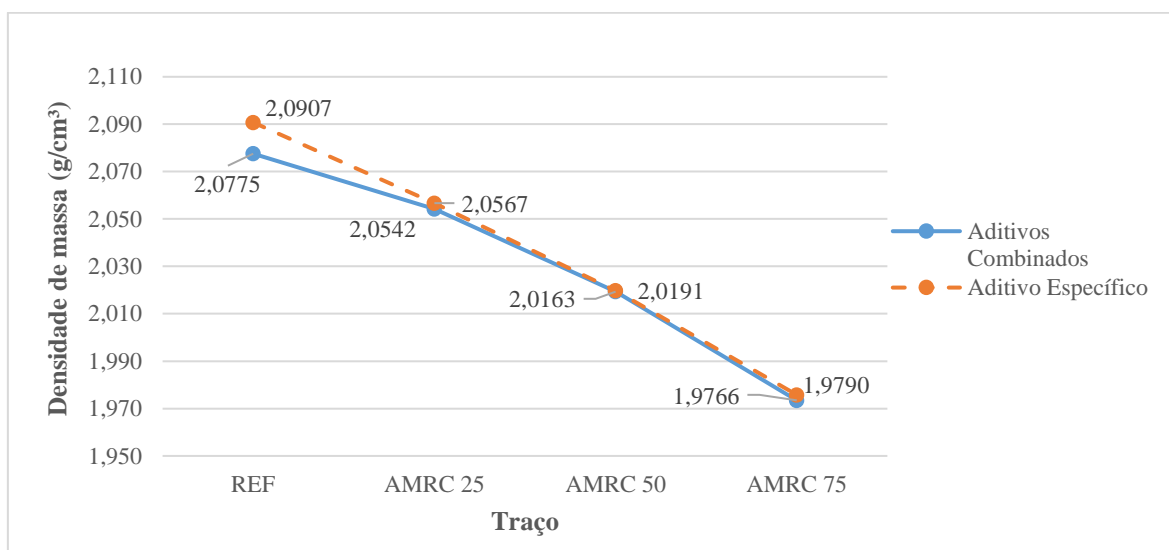


Figura 4.7 – Densidade de massa dos traços formulados, no estado fresco (Fonte: a autora).

Nota-se também na Figura 4.7 que as diferenças entre a densidade de massa dos traços com aditivos combinados e daqueles com aditivo específico não foram expressivas. Logo, o ensaio não demonstrou sensibilidade perante a mudança desta variável e a que mais pesou na definição do parâmetro foi a incorporação de resíduo. Entre a menor densidade de massa, do traço AMRC75-C, e a maior, do traço REF-E, notou-se uma diferença de apenas 5,5 %.

A Figura 4.8, disposta na sequência, mostra o teor de ar incorporado das argamassas produzidas, no estado fresco. Observa-se que o teor de ar incorporado sofreu redução ao passo que foi sendo aumentada a proporção de substituição do AMN pelo AMRC. Além disso, é possível notar que o uso de aditivo específico (PP) conduziu a menores teores de ar incorporado, se comparado aos casos de uso de aditivos combinados (MV + SP).

Como se pode notar na Figura 4.8, o traço REF-C, semelhante à formulação 9 de Souza et al. (2012), obteve um teor de ar incorporado de 1,34 %, inferior ao obtido para o mesmo ensaio no trabalho destes autores, que encontraram um valor de 2,10 %. Vale lembrar que, apesar da semelhança entre os traços, os materiais empregados nestes dois estudos foram diferentes e que, além disso, o teor de aditivo superplastificante (SP) empregado na presente pesquisa foi um pouco maior que o utilizado por Souza et al. (2012).

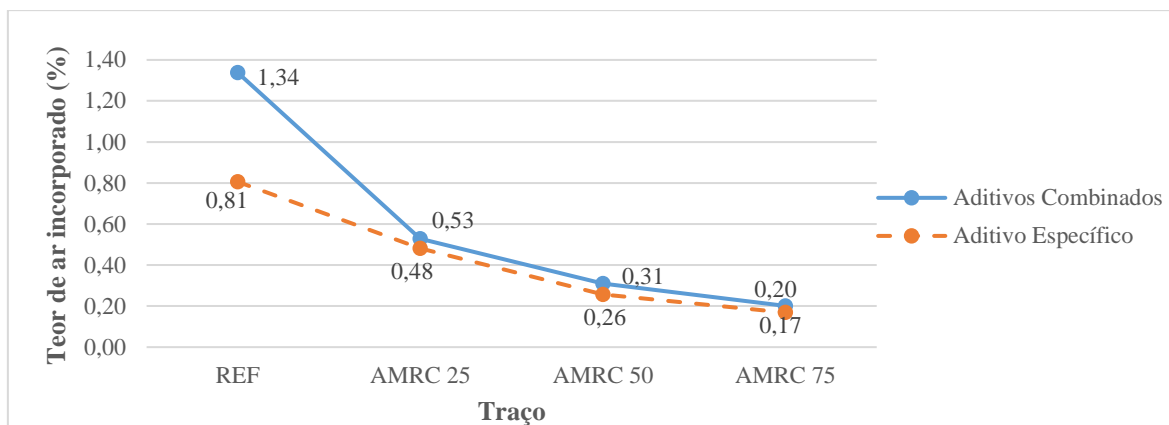


Figura 4.8 – Teor de ar incorporado das argamassas produzidas (Fonte: a autora).

A diminuição do teor de ar incorporado com o aumento da quantidade de agregado reciclado empregada nas misturas pode ser associada à elevada absorção destes agregados, os quais, por este motivo, acabam interagindo melhor com a pasta cimentícia, como constatado na pesquisa de Leite (2001), promovendo um melhor empacotamento dos grãos e, conseqüentemente, inviabilizando a maior entrada de ar na argamassa durante o procedimento de mistura da mesma. Ademais, deve ser também considerada a maior disponibilidade de finos no AMRC, que auxiliam na aproximação dos grãos, reduzindo o teor de ar incorporado. Gonçalves et al. (2010) observaram uma tendência similar, com um menor teor de ar incorporado em argamassas com resíduos em sua composição.

De todo modo, os valores encontrados neste estudo para o teor de ar incorporado, entre 0,17 % e 1,34 %, podem ser considerados muito baixos, especialmente se comparados aos observados em outros estudos disponíveis na literatura, também realizados com argamassas autonivelantes, como os de Rubin (2015), com resultados entre 1,66 % e 9,00 %, e de Silva (2016), com teores de ar incorporado entre 12,00 % e 16,00 %. Os baixos teores encontrados na presente pesquisa para este parâmetro são um bom indicativo da qualidade das argamassas produzidas.

Por meio da avaliação dos resultados apresentados, nota-se que as argamassas formuladas tiveram características suas como a tendência à exsudação, a densidade de massa e o teor de ar incorporado fortemente influenciados pela incorporação de agregado reciclado, demonstrando, na maioria dos casos, redução gradual em contraposição ao aumento do teor de resíduo em sua constituição, o que pode ser considerado satisfatório para o material. O tempo de cura, por outro lado, não demonstrou ser significativamente condicionado a inclusão de agregados reciclados na mistura, tendo sido mais influenciado pelo teor de uso de aditivos, combinados ou específico, em cada um dos traços.

Quanto às combinações de aditivos testadas, o uso de aditivo específico, ao invés do comum emprego de aditivos combinados, se mostrou vantajoso, tanto para a redução do teor de ar incorporado das argamassas, quanto para a diminuição da quantidade de água exsudada pelas mesmas. A densidade de massa das formulações não foi muito influenciada pela variação destas combinações.

Dentre os traços propostos, aqueles que mais empregaram aditivos e ainda obtiveram os maiores teores de exsudação e de ar incorporado foram justamente os de referência, o que indica que estes acabaram tendo uma performance, no estado fresco, aquém da das formulações com agregado reciclado de concreto. Entre os teores de substituição testados, por sua vez, o que permitiu, para ambas as combinações, a menor utilização de aditivo foi o com 25 % de AMRC; a mais reduzida quantidade de água exsudada, o com 50 % de AMRC; e os mais baixos teores de ar incorporado e densidade de massa, o com 75 % de AMRC.

Pelo citado, e considerando como primordial neste estudo o intuito de propor a formulação de uma argamassa autonivelante de caráter sustentável, pode-se dizer que o teor de incorporação de resíduo que apresentou um melhor comportamento foi o de 75 %, visto que a quantidade de aditivo por ele empregada foi menor que a do traço de referência, sua exsudação uma das mais baixas dentre as encontradas, seu tempo de cura satisfatório, e seu teor de ar incorporado e densidade de massa os menores entre os traços estudados. Como a combinação de aditivo mais vantajosa foi a com aditivo polifuncional, destaca-se como melhor traço, levando-se em conta os ensaios realizados, o AMRC75-E. A Tabela 4.5, abaixo, apresenta o resumo dos resultados encontrados na presente pesquisa.

Tabela 4.5 – Resumo dos resultados obtidos na pesquisa.

| <b>Traço</b> | <b>Aditivo ajustado – Teor final (%)</b> | <b>Quantidade de água exsudada (%)</b> | <b>Tempo de cura (min)</b> | <b>Densidade de massa (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Teor de ar incorporado (%)</b> |
|--------------|--|--|----------------------------|--|-----------------------------------|
| REF-C        | SP - 0,50                                | 2,61                                   | 25                         | 2,0775                                       | 1,34                              |
| REF-E        | PP - 0,95                                | 2,42                                   | 20                         | 2,0907                                       | 0,81                              |
| AMRC25-C     | SP - 0,30                                | 2,44                                   | 15                         | 2,0542                                       | 0,53                              |
| AMRC25-E     | PP - 0,83                                | 2,39                                   | 15                         | 2,0567                                       | 0,48                              |
| AMRC50-C     | SP - 0,40                                | 2,23                                   | 15                         | 2,0163                                       | 0,31                              |
| AMRC50-E     | PP - 0,87                                | 2,04                                   | 20                         | 2,0191                                       | 0,26                              |
| AMRC75-C     | SP - 0,40                                | 2,24                                   | 20                         | 1,9766                                       | 0,20                              |
| AMRC75-E     | PP - 0,87                                | 2,11                                   | 20                         | 1,9790                                       | 0,17                              |

Fonte: a autora.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A presente pesquisa foi conduzida com a intenção de formular e avaliar argamassas autonivelantes com incorporação de Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC), verificando os efeitos da inserção destes resíduos sobre suas propriedades no estado.

Vale observar que os resultados apresentados neste estudo têm influência direta dos materiais e dos métodos nele empregados. Logo, não devem ser tomados de maneira absoluta, sendo sempre necessária a execução de novas pesquisas para que venham a ser confirmados e / ou complementados.

No decorrer deste capítulo são citadas as principais conclusões alcançadas por intermédio da execução do programa experimental da pesquisa, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

### **5.1. Conclusões**

Entre as conclusões obtidas pela realização deste trabalho, a primeira, e provavelmente mais relevante, foi que há possibilidade de constituir formulações de argamassas com características autonivelantes mesmo com elevados teores de incorporação de AMRC, da ordem de 75 %, bastando para tanto a realização de ajustes em suas proporções de aditivos. Este fato confirmou a hipótese da pesquisa.

Ao contrário do esperado, os menores teores de aditivo final foram empregados em argamassas com resíduos, não nas de referência. Isto pode ser relacionado a eficácia do processo de pré-molhagem utilizado para a preparação dos agregados reciclados, bem como à compensação entre estes agregados e os naturais ter sido realizada em volume, não em massa, levando à constituição de misturas com uma menor quantidade de finos em sua composição.

O primeiro parâmetro das formulações analisado, no estado fresco, foi a exsudação de água, sendo possível notar que elas exsudaram menos com maiores teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado, bem como com o uso de aditivo específico (PP). A relação da exsudação com o emprego do AMRC pode ser atribuída à elevada absorção deste material e a grande disponibilidade de finos no mesmo, que juntas contribuíram para a retenção da água de amassamento na mistura, impedindo sua perda precoce para o ambiente.

Ademais, observou-se que os traços que exsudaram menos foram também aqueles que empregaram uma menor quantidade de aditivos.

Sobre o tempo de cura, os resultados para este parâmetro se mostraram mais condicionados à proporção de aditivo utilizada na formulação, do que propriamente ao teor de incorporação de agregado reciclado. Misturas com uma quantidade mais elevada de aditivos apresentaram, de modo geral, tempos de cura maiores. Visto que todas as argamassas formuladas tiveram resultados iguais ou superiores a 15 minutos, que é o mínimo normalmente requerido para a sua utilização, elas podem ser consideradas aplicáveis em obras.

As densidades de massa encontradas na pesquisa não foram muito influenciadas pela combinação de aditivos utilizada. Por outro lado, estiveram largamente condicionadas à inserção de agregados reciclados na mistura. Isto porque, como a massa específica do AMRC é menor que a do AMN, maiores proporções de substituição de AMN por AMRC levaram à constituição de argamassas com menores densidades de massa.

De modo semelhante, o teor de ar incorporado, na maioria dos casos, foi reduzido pelo aumento do teor de incorporação de AMRC nas argamassas autonivelantes. Esta ocorrência pode ser justificada pelo melhor empacotamento promovido pelo uso de agregados reciclados, que por serem mais finos e terem uma absorção maior, interagem de maneira satisfatória entre si e com a pasta cimentícia, dificultando a entrada de ar no material durante o processo de mistura. Quanto à combinação de aditivos empregada, a que possibilitou o alcance de teores um pouco menores de ar incorporado foi a com aditivo específico (PP).

Assim, notou-se que o agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC) não trouxe grandes prejuízos às misturas de argamassas autonivelantes com ele produzidas, especialmente após realizados os devidos ajustes, permitindo-as alcançar a consistência adequada, sem segregação ou exsudação, além de reduzir o teor de ar incorporado, a quantidade de água exsudada e a densidade de massa. No que tange às combinações de aditivos testadas, a que se mostrou mais vantajosa no decorrer da análise das propriedades no estado fresco estudadas foi a com aditivo específico, em questão o aditivo plastificante polifuncional (PP), o qual possibilitou a elaboração de misturas com uma menor exsudação e teor de ar incorporado mais baixo.

De modo geral, os traços que agregaram maiores benefícios aos parâmetros analisados foram aqueles com 75 % de substituição de AMN por AMRC, em especial o AMRC75-E. Considera-se, para esta afirmação, que esta foi uma das formulações que

apresentou menores teores de exsudação e densidade de massa, o mais baixo teor de ar incorporado e um tempo de cura satisfatório. Além disso, ela empregou uma quantidade de aditivo inferior a utilizada no traço de referência e foi a que permitiu a aplicação de uma maior quantidade de resíduo, sendo, portanto, a mais sustentável, ao promover uma taxa mais alta de reuso deste material e a consequente redução da demanda pela produção de areia, seja ela natural ou artificial.

Vale ressaltar, no entanto, que se faz necessário realizar ensaios que comprovem o bom comportamento do referido traço também no estado endurecido, antes de sua efetiva aplicação em uma obra. Ademais, é imprescindível verificar o real custo de sua utilização, de modo a igualmente avaliar a viabilidade econômica de empregá-lo.

## **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros, sugerem-se as seguintes possibilidades de pesquisa:

- caracterizar as formulações propostas neste estudo no estado endurecido, realizando ensaios de resistência mecânica, de retração por secagem, de aderência e outros que forem julgados convenientes;
- executar uma análise dos custos dos traços formulados nesta pesquisa, de modo a sugerir, com base em dados técnicos e econômicos, o mais aplicável em obras;
- realizar um estudo de dosagem, testando os mesmos teores de incorporação de AMRC utilizados neste trabalho, com o intuito de reduzir o consumo de cimento do traço base adotado no mesmo, sem comprometer a fluidez e a estabilidade das argamassas produzidas;
- avaliar os efeitos do uso de diferentes tipos de adições nos traços propostos, verificando qual a que permite constituir argamassas com melhor desempenho;
- avaliar se a incorporação de agregados reciclados mistos (compostos tanto por materiais cimentícios quanto por materiais cerâmicos) em argamassas autonivelantes também é viável;
- verificar se o uso de fibras nos traços com AMRC propostos pode ser vantajoso para o combate à retração por secagem das argamassas autonivelantes formuladas;
- avaliar os efeitos da incorporação de AMRC sobre a durabilidade de argamassas autonivelantes para contrapiso.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aitcin, P. C. (2000). *Concreto de alto desempenho*. Tradução: Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI.
- [2] American Society for Testing and Materials – ASTM. (2017). *ASTM C1708: Standard test methods for self-leveling mortars containing hydraulic cements*. ASTM International, United States.
- [3] Angulo, S. C. (2005). *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*. (Tese de Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1991). *NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1992). *NBR 5737: Cimento Portland resistente a sulfatos*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2009). *NBR 7211: Agregados para concreto - especificação*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2010). *NBR 7222: Concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2008). *NBR 10.908: Aditivos para argamassa e concreto - Ensaios de caracterização*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2012). *NBR 12.041: Argamassa de alta resistência mecânica para pisos – determinação da resistência à compressão simples e tração por compressão diametral*. ABNT, Rio de Janeiro.

- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2015). *NBR 12.655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento*. Versão Corrigida. ABNT, Rio de Janeiro.
- [11] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2005). *NBR 13.278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2004). *NBR 15.116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2005). *NBR 15.259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2008). *NBR 15.558: Concreto - Determinação da exsudação*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2013). *NBR 15.575-3: Edificações habitacionais — Desempenho – Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2017). *NBR 16.605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2009). *NBR NM 26: Agregados - Amostragem*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2001). *NBR NM 27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório*. ABNT, Rio de Janeiro.

- [19] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2001). *NBR NM 30: Agregado miúdo - determinação da absorção de água*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [20] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2006). *NBR NM 45: Agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [21] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2003). *NBR NM 46: Agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75  $\mu\text{m}$ , por lavagem*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [22] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2009). *NBR NM 52: Agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [23] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2003). *NBR NM 248: Agregados – determinação da composição granulométrica*. ABNT, Rio de Janeiro.
- [24] Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR. (2001). *UNE-EN 13.318: Materiales para revestimientos continuos y revestimientos continuos – definiciones*. AENOR, España.
- [25] Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR. (2003). *UNE-EN 13.813: Pastas autonivelantes y pastas autonivelantes para suelos - características y especificaciones*. AENOR, España.
- [26] Araújo, T. R., Anjos, M. A. S., Martinelli, A. E., Farias, E. C., Silva, C. R. F., & Gomes, V. L. L. (2015). Efeitos da incorporação do filler calcário e do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar em argamassas autonivelantes. In: *XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*. Porto Alegre (RS).
- [27] Azkarate, I., & Calvera, J. A. (2005). Morteros autonivelantes para solados y pavimentos. *Cemento hormigón*, 882.

- [28] Bian, H. (2012). *Colloidal behavior of casein biopolymer in alkaline solution and its application in self-levelling underlayments (SLUs)* (Dissertation). Technical University of Munich.
- [29] Binggeli, C., & Greichen, P. (2010). Floor design considerations. In *Interior Graphic Standards*. (2<sup>nd</sup> ed.). New Jersey: Wiley.
- [30] Branco, A. C., & Brito, M. (2014). Contrapiso autonivelante. In D. B. Costa, & R. M. C. Leite (Eds.), *2º Caderno de Casos de Inovação na Construção Civil* (pp. 16-21). Salvador: Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC).
- [31] British Standards Institution – BSI. (2002). *BS 8500-2: Concrete - complementary British Standard to BS EN 206-1, Part 2: Specification for constituent materials and concrete*. BSI, United Kingdom.
- [32] Canbaz, M., Topçu, I. B., & Atesin, O. (2016). Effect of admixture ratio and aggregate type on self-leveling screed properties. *Construction and Building Materials*, 116, 321-325.
- [33] Carrijo, P. M. (2005). *Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*. (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [34] Carvalho, H. D. S. (2015). *Análise da retração por secagem em argamassas autonivelantes utilizando adições minerais como substitutos parciais do Cimento Portland*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis.
- [35] Cichinelli, G. (2012). Execução de contrapiso autonivelante industrial. *Revista Técnica*, Edição 192.
- [36] Ciplan. (2018). *Cimento Portland: Cimento CPV Extra Forte*. Disponível em: < <http://www.ciplan.com.br/pt-br/produtos#cimento-portland> >. Acesso em: 21 mar. 2018.

- [37] Cordeiro, L. N. P. (2013). *Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [38] Cuenca-Moyano, G. M., Martín-Morales, M., Valverde-Palacios, I., Valverde-Espinosa, I., & Zamorano, M. (2014). Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar. *Construction and Building Materials*, 70, 71–79.
- [39] Egle, T. (2010). Contrapiso autonivelante. *Revista Técnica*, 164, novembro / 2010.
- [40] European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems - EFNARC (2001). *Specification and guidelines for polymermodified cementitious flooring as wearing surfaces for industrial and commercial use*. United Kingdom.
- [41] European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems - EFNARC (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. United Kingdom.
- [42] Evangelista, L., & Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 32, 9–14.
- [43] Evangelista, L., Guedes, M., Brito, J., & Ferro, A. (2012). Análise microscópica de betões com agregados finos reciclados de betão. In: *4º Congresso Nacional Construção*. Coimbra, Portugal.
- [44] Fan, C., Huang, R., Hwang, H., & Chao, S. (2016). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 112, 708–715.
- [45] Felekoglu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun A., & Uyulgan, B. (2006). The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. *Cement and Concrete Research*, 36, 1719-1726.

- [46] Fiorentin, T. R. (2011). *Influência do aditivo modificador de viscosidade e do fíler calcário no comportamento de pastas e argamassas de concreto auto-adensável* (Monografia). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.
- [47] Fonseca, G. C. (2010). *Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte.
- [48] GCP Applied Technologies. (2017a). *Informações do produto: Mira Flow - Aditivo plastificante polifuncional (Mid Range)*. GCPAT, Sorocaba (SP).
- [49] GCP Applied Technologies. (2017b). *Informações do produto: Tec-Flow - Aditivo superplastificante para concreto*. GCPAT, Sorocaba (SP).
- [50] GCP Applied Technologies. (2017c). *Informações do produto: V-MAR 3 - Aditivo modificador de viscosidade*. GCPAT, Sorocaba (SP).
- [51] German Institute for Standardization – DIN. (2002). *DIN 4226-100: Aggregates for mortar and concrete, part 100: recycled aggregates*. DIN, Germany.
- [52] Gomes, M. F., & Brito, J. (2008). *Técnica de pré-saturação de agregados reciclados para o fabrico de betão*. Instituto Superior Técnico, Lisboa. 9 p.
- [53] Gonçalves, R. D. C. (2001). *Agregados reciclados de resíduos de concreto – um novo material para dosagens estruturais* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo (USP), São Carlos.
- [54] Gonçalves, G. P., Alexandre, J., Dias, D. P., Dias Júnior, N. S., & Anderson, R. B. (2010). Incorporação de resíduo proveniente de usina de beneficiamento de mármore do município de Cachoeiro do Itapemirim na confecção de argamassas. In: *19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat)*, Campos do Jordão.

- [55] Gowda, M. R., Narasimhan, M. C., & Karisiddappa. (2011). Development and study of the strength of self-compacting mortar mixes using local materials. *J. Mater. Civ. Eng.*, 23 (5), 526-532.
- [56] Güneyisi, E., Gesoglu, M., Atlan, I., & Öz, H. O. (2015). Utilization of cold bonded fly ash lightweight fine aggregates as a partial substitution of natural fine aggregate in self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 74, 9–16.
- [57] Güneyisi, E., Gesoglu, M., Ghanim, H., Ipek, S., & Taha, I. (2016). Influence of the artificial lightweight aggregate on fresh properties and compressive strength of the self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 116, 151–158.
- [58] Hamoy, L. B. (2017). *Contrapiso autonivelante: uma proposta de sistema construtivo racionalizado para edificações* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém.
- [59] Jawahar, J. G., Sashidhara, C., Reddy, I. V. R., & Peter, J. A. (2013). Optimization of superplasticiser and viscosity modifying agent in self compacting mortar. *Asian Journal of Civil Engineering*, 14 (1), 71-86.
- [60] Kantro, D. L. (1980). Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - a miniature slump test. *Cement, Concrete. and Aggregates*, 2 (2), 95-102.
- [61] Kapoor, K., Singh, S. P., & Singh, B. (2016). Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 128, 67–76.
- [62] Katsiadramis, N. J., Sotiropoulou, A. B., & Pandermarakis, Z. G. (2010). Rheological and mechanical response modifications for a self-Leveling mortar. In: *EPJ Web of Conferences*, 6, 23002. EDP Sciences.
- [63] Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35, 763– 769.

- [64] Kou, S. C., & Poon, C. S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 31, 622–627.
- [65] Kumar, B. M. V., Ananthan, H., & Balaji, K. V. A. (2017). Experimental studies on utilization of coarse and finer fractions of recycled concrete aggregates in self compacting concrete mixes. *Journal of Building Engineering*, 9, 100-108.
- [66] Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC. (2006). *E 471: Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*. LNEC, Portugal.
- [67] Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Fernández, J. M., Galvín, A. P., Agrela, F., & Barbudo, A. (2014). Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 71, 289–298.
- [68] Leite, M. B. (2001). *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.
- [69] Libre, N. A., Khoshnazar, R., & Shekarchi, M. (2010). Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 24, 1262–1271.
- [70] Lima, J. A. R. (2000). Aggregate obtained from C&D waste recycling - proposition of specification for use in concrete. *In: CIB Symposium on Construction and Environment – Theory into practice*. Anais. EPUSP, São Paulo.
- [71] Lorenzet, K. F., & Gomes, M. R. (2012). *Incorporação de resíduos de construção e demolição em argamassas autonivelantes para contrapisos*. UNISUL.
- [72] Machado, V. C., Cruz, W. S., & Cordeiro, L. N. P. (2018). Efeito da sílica ativa em argamassas de chapisco com RCC. *In: 60º Congresso Brasileiro do Concreto*. Foz do Iguaçu: IBRACON.



- [73] Malta, J. O., Silva, V. S., Gonçalves, J. P., & Toledo Filho, R. D. (2014). Influência da pré-saturação do agregado miúdo reciclado na viscosidade e resistência à compressão de argamassas. *Ambiente Construído*, 14(1), 85-98.
- [74] Martínez, P. S., Cortina, M. G., Martínez, F. F., & Sanchez, A. R. (2016). Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. *Journal of Cleaner Production*, 118, 162-169.
- [75] Martins, A. J. G. (2012). *Estudo da durabilidade dos revestimentos de piso*. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- [76] Martins, E. J. (2009). *Procedimento para dosagem de pastas para argamassa auto-nivelante* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba.
- [77] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. (2ª ed.). São Paulo: IBRACON.
- [78] Ministério do Meio Ambiente – MMA. (2002). *Resolução nº 307: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil*. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.
- [79] Miranda, L. F. R. (2005). *Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil* (Tese). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [80] Monte, R., & Figueiredo, A. D. (2008). *Avaliação de métodos de ensaio de fluidez em pastas de cimento com aditivos superplastificantes* (Boletim Técnico). Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- [81] Motzet, H. T. (2007). The performance of gypsum based self-leveling compounds. In Leopolder, F. *Proceedings of the First International Drymix Mortar Conference (IDMMC One)*. Nuremberg, 26-32.

- [82] Moyano, G. M. C., Morales, M. M., Palacios, I. V., Espinosa, I. V., & Zamorano, M. (2014). Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar. *Construction and Building Materials*, 70, 71–79.
- [83] Nakakura, E. H., & Bucher, H. R. E. (1997). Pisos autonivelantes – propriedades e instalação. In: *II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*. Simpósio conduzido pelas organizações CEPED, EPUFBA, UCSAL e UEFS, Salvador (BA).
- [84] Onishi, K., & Bier, T. A. (2010). Investigation into relations among technological properties, hydration kinetics and early age hydration of self-leveling underlayments. *Cement and Concrete Research*, 40, 1034–1040.
- [85] Pereira, P. S. B. (2010). *Betões estruturais com a incorporação de agregados finos reciclados de betão: influência de superplastificantes* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [86] Reis, F. J. L. (2013). *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém.
- [87] Rizwan, S. A., & Bier, T. A. (2012). Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 27, 398–403.
- [88] Rubin, A. P. (2015). *Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: análise do desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.
- [89] Safiuddin, M., West, J. S., & Soudki, K. A. (2011). Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 25, 973–978.
- [90] Schulz, R. (1993). The processing of building rubble as concrete aggregate in Germany. In *3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*. Odense.

- [91] Seifert, S., Neubauer, J., & Goetz-Neunhoeffler, F. (2012). Spatially resolved quantitative in-situ phase analysis of a self-leveling compound. *Cement and Concrete Research*, 42, 919–927.
- [92] Silva, S. H. L. (2016). *Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba.
- [93] Silva, V. D. (2013). A importância do processo de desenvolvimento tecnológico na implantação de novas tecnologias – Case contrapiso autonivelante. In *X Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa (SBTA)*. Fortaleza.
- [94] Silva, Y. F., Robayo, R. A., Matthey, P. E., & Delvasto, S. (2016). Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 639–644.
- [95] Solyman, M. (2005). *Classification of recycled sands and their applications as fine aggregates for concrete and bituminous mixtures* (Dissertation). Kassel.
- [96] Souza, A. S., Ferreira, A. Z., & Azevedo, B. L. O. (2012). *Estudo para o desenvolvimento de argamassa autonivelante para contrapiso* (Monografia). Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba.
- [97] Souza, N. C. (2013). *Análise de desempenho do contrapiso autonivelante em relação ao sistema tradicional* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte.
- [98] Works Bureau Technical Circular - WBTC. (2002). *WBTC No. 12: Specifications facilitating the use of recycled aggregates*. WBTC, Hong-Kong.
- [99] Yang, L., Zhang, Y., & Yan, Y. (2016). Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar. *Journal of Cleaner Production*, 127, 204-213.

[100] Zega, C. J., & Maio, A. A. D. (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*, 31, 2336–2340.

[101] Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu, W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 179–186.

[102] Zhi, Z., Huang, J., Guo, Y., Lu, S., & Ma, B. (2017). Effect of chemical admixtures on setting time, fluidity and mechanical properties of phosphorus gypsum based self-leveling mortar. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), 1836-1843.