



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Ruan Landolfo da Silva Ferreira**

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE AREIA RECICLADA DE  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM  
ARGAMASSAS MISTAS DE REVESTIMENTO**

**Natal/RN  
2017**

**Ruan Landolfo da Silva Ferreira**

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE AREIA RECICLADA DE  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM  
ARGAMASSAS MISTAS DE REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Andreza Kelly C. Nóbrega  
Coorientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro S. dos Anjos

Natal/RN  
2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Ferreira, Ruan Landolfo da Silva.

Efeitos da incorporação de areia reciclada de resíduos de construção e demolição (RCD) em argamassas mistas de revestimento / Ruan Landolfo da Silva Ferreira. - 2017.

132 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Andreza Kelly Costa Nóbrega.

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

1. Resíduos de construção e demolição - Dissertação. 2. Agregado reciclado - Dissertação. 3. Argamassas de revestimento - Dissertação. 4. Composição granulométrica - Dissertação. I. Nóbrega, Andreza Kelly Costa. II. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.4.036

RUAN LANDOLFO DA SILVA FERREIRA

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE AREIA RECICLADA DE  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM  
ARGAMASSAS MISTAS DE REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Andreza Kelly Costa Nóbrega – Presidente

---

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Coorientador

---

Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim – Examinador Interno

---

Prof. Dr. Walney Gomes da Silva – Examinador externo (IFRN)

**Natal/RN, 31 de março de 2017.**

# **EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE AREIA RECICLADA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM ARGAMASSAS MISTAS DE REVESTIMENTO**

**Ruan Landolfo da Silva Ferreira**

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Andreza Kelly C. Nóbrega  
Coorientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro S. dos Anjos

## **RESUMO**

O processo de construção, reforma e demolição, pode ocasionar significativos problemas ao meio ambiente, devido a extração de matérias primas e a destinação inadequada dos resíduos gerados. Em especial os resíduos de construção e demolição (RCD) que, comumente correspondem a mais da metade dos resíduos sólidos urbanos, tem como principais destinos, terrenos baldios, margens de estradas e rios, acarretando sérios impactos ambientais, sociais e econômicos. Atualmente, a reutilização de agregados reciclados (AR), especialmente de composição mista, é estudada em menor grau, quando comparado aos AR de concreto. Com isso, por não possuir alternativas para sua utilização, uma grande quantidade desse tipo de AR é armazenada pelas usinas. Nesse sentido, buscou-se analisar a viabilidade técnica e econômica da utilização de AR com diferentes composições granulométricas e em condição lavada, à níveis de substituição de 25, 50, 75 e 100% do agregado natural (AN), na produção de argamassas mistas de revestimento. Para a produção das argamassas, utilizou-se cimento CP II Z-32, cal CH-I e uma proporção em volume de 1:1:6, cujo teor de água foi determinado para as misturas alcançarem uma consistência de 260 mm. Inicialmente, analisou-se as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais dos agregados e da fração de finos (<0,15 mm). Buscando avaliar a viabilidade técnica das argamassas foram caracterizadas no estado fresco, por meio dos ensaios de consistência, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado. E no estado endurecido, a resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade dinâmico, absorção por capilaridade, absorção por imersão, resistência de aderência e fissuração. Foi utilizado o custo para produzir 1 m<sup>3</sup> de argamassa visando avaliar a viabilidade

econômica. Constatou-se, que as argamassas com AR, independentemente de sua composição granulométrica ou condição, apresentaram maior consumo de água, menor densidade de massa e teor de ar incorporado, assim como adequada capacidade de retenção de água. No estado endurecido, as argamassas que possuíam AR com a presença de finos, apresentaram maior resistência, maior módulo de elasticidade e menor porosidade e permeabilidade. No entanto, o desempenho dos revestimentos frente ao potencial de aderência ao substrato e a quantidade de fissuras, foi inferior, confirmando a premissa de que a utilização de AR com finos não é indicada para a produção de argamassas de revestimento. Quanto a viabilidade econômica, ao incorporar o AR, o custo para produzir 1 m<sup>3</sup> de argamassa diminui. No entanto, admite-se que é viável a utilização de AR para a produção de argamassas de revestimento, especialmente quando se dispõe de agregados com adequada composição granulométrica, isentos de finos e em condição lavada.

**Palavras-chave:** Resíduos de construção e demolição, agregado reciclado, argamassas de revestimento, composição granulométrica.

# **EFFECTS OF THE INCORPORATION OF RECYCLED SAND OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE (CDW) IN MIXED COATING MORTARS**

**Ruan Landolfo da Silva Ferreira**

Adviser: Prof.<sup>a</sup> Dra. Andreza Kelly C. Nóbrega  
Co-Adviser: Prof. Dr. Marcos Alyssandro S. dos Anjos

## **ABSTRACT**

The construction, reform and demolition process can cause significant problems to the environment due to the extraction of raw materials and an inadequate disposal of the waste generated. In particular, construction and demolition wastes (CDW), which commonly correspond to more than half of urban solid waste, have as main destinations, vacant lots, roadsides and rivers, causing serious environmental, social and economic impacts. Currently, a recycling of recycled aggregates (RA), especially of mixed composition has been studied to lesser extent when compared to RA of concrete. Therefore, because it does not have alternatives for their use, a large amount of this type of RA is stored by plants. In this sense, the aim of this research is to analyze the technical and economic viability of the use of RA with different grain size and washed condition compositions, at 25, 50, 75 and 100% substitution levels of the natural aggregate (NA), in the production of mixed mortars. For the production of mortars, CP II Z-32 cement, lime CH-I and a volume ratio of 1:1: 6 were used. Water content was adjusted to mixtures with a consistency of 260 mm. Initially, the physical, chemical, mineralogy and microstructural properties of the aggregates and the fines fraction (<0.15 mm) were analyzed. Seeking to assess the technical feasibility of mortars were characterized fresh, through consistency tests, water retention, bulk density and entrained air content. And in the hardened state, the compressive strength, flexural tensile strength, dynamic modulus of elasticity, water absorption by capillarity, immersion absorption, adherence strength and susceptibility to cracking. The cost of production of 1 m<sup>3</sup> of mortar was used for an assessment of economic feasibility. It was showed that, as mortars with RA, regardless of their size distribution or condition, presented higher water consumption, lower bulk density and incorporated air content,

as well as water retention capacity. In the hardened state the mortars had RA with the presence of thin, had higher resistance, higher modulus and lower porosity and permeability. However, the performance of the mortar coverings to the potential of adhesion to the substrate and a number of cracks has been lower, confirming a premise that the use of RA with fines is not indicated for coating mortars. As for the economic feasibility, to incorporate RA, the cost to produce 1 m<sup>3</sup> of mortar decreases. However, it is recognized that the use of RA for the production of coating mortars is feasible, especially when aggregates with adequate size distribution are available, without fines and in washed condition.

**Keywords:** Construction and demolition waste, recycled aggregate, coating mortar, granulometric composition.

“Precisamos dar um sentido humano às nossas construções. E, quando o amor ao dinheiro, ao sucesso nos estiver deixando cegos, saibamos fazer pausas para olhar os lírios do campo e as aves do céu”.

**Érico Veríssimo**

Dedico esse trabalho a Deus, pois toda honra e glória, pertencem a ti, Senhor!

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, a quem sou infinitamente grato, pela vida, por ter me dado força e coragem para perseverar e por ter me mostrado caminhos e saídas em todos os momentos difíceis;

A minha Mãe, Rosa Nália, minha maior inspiração e orgulho, por toda a dedicação, educação, amor, incentivo, carinho, lições de vida e apoio incondicional;

Agradeço imensamente a minha namorada, Jéssyca Emanuella, por todo o companheirismo, pelo carinho, amor e paciência durante toda essa jornada. Sem você, a realização deste trabalho não seria possível. Agradecer também a sua família, por todo o carinho e incentivo, em especial, aos seus pais e avós;

A toda a minha família, em especial a minha avó, meu tio, e sobrinhos por toda confiança, incentivo e carinho;

A minha orientadora, Andreza Nóbrega, por ter me orientado em todas as fases da pesquisa, por toda paciência, incentivo e dedicação para realização deste trabalho. E ao meu coorientador, Marcos Alyssandro, pela orientação e por todas as sugestões, incentivos, disponibilidade, compreensão, paciência e comprometimento;

A banca de defesa por todas as contribuições que foram de grande valia para o enriquecimento deste trabalho;

A Arnaldo Carneiro, por sempre está disposto a ajudar e por todas as contribuições realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho;

A Ana Cristina e todos que fazem parte da Duarte Usina de Reciclagem, por todo auxílio, apoio e comprometimento para a realização desta pesquisa;

A todos que fazem parte da SS Empreendimentos, em especial Ana Carolina, por toda a contribuição para a produção dos revestimentos;

Ao técnico do laboratório de Construção Civil da UFRN, Sandro Ricardo, sempre com boa vontade e bom humor, auxiliou-me na realização dos ensaios e por todos os ensinamentos compartilhados;

Aos técnicos do laboratório de Ensaios Mecânicos, Jonas Lopes e Lindolfo Lima pelos inúmeros ensaios realizados;

Aos técnicos do laboratório de Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais, Igor e Carla pelas inúmeras análises de DRX, FRX e MEV;

A Roberto, técnico do Laboratório de Análises Térmicas, que sempre com boa vontade e paciência, realizou os ensaios de BET por inúmeras vezes;

A Carlos Henrique e Raissa Silva por toda a ajuda durante a fase experimental desta pesquisa. Vocês foram, sem dúvidas, muito importantes;

Ao grupo de pesquisa do IFRN, em especial, Gabriela Bruno, Ayrton Wagner, Luiza Gabriela e Aldemaykon Melo por todo apoio e ajuda durante a caracterização dos materiais;

Aos amigos que fiz durante esse período de mestrado, dos quais não posso deixar de mencionar Cinthia Maia, Ítalo Vale, Thiago Fonseca, Lucy Kheyler e Danyel Paiva, e agradecer por todo o companheirismo e ajuda durante esse período;

Aos meus amigos de vida acadêmica, que mesmo de longe, se fizeram presentes por inúmeras ocasiões, em especial, a Savanna Cristina, Sumaya Luna e Isabelly Pinto;

A todos os professores que fazem parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC) por me proporcionar o conhecimento para a edificação desse título;

A CAPES pela concessão de bolsa durante parte da realização deste trabalho;

Enfim, agradeço a todos que, de uma forma ou outra, colaboraram para a realização deste trabalho e, principalmente, porque inúmeras vezes me apoiaram com palavras ou ações, torcendo pelo meu sucesso.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE TABELAS .....	xv
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	xvi
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
Introdução e relevância da pesquisa .....	1
1.1 Justificativa .....	3
1.2 Objetivos da Pesquisa.....	5
1.2.1 Objetivo geral .....	5
1.2.2 Objetivos específicos .....	5
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>7</b>
Fundamentação teórica .....	7
2.1 Resíduos de construção e demolição (RCD).....	7
2.1.1 Classificação .....	7
2.1.2 Geração e deposição final do RCD.....	8
2.1.3 Reutilização dos RCD como agregado reciclado .....	14
2.2 Argamassas de revestimento .....	18
2.3 Propriedades das argamassas no estado fresco.....	21
2.3.1 Trabalhabilidade.....	21
2.3.2 Consistência.....	22
2.3.3 Retenção de água.....	23
2.3.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	25
2.3.5 Retração .....	26
2.4 Propriedades das argamassas no estado endurecido .....	27
2.4.1 Resistência mecânica.....	27
2.4.2 Capacidade de absorver deformações.....	28
2.4.3 Aderência.....	30
2.4.4 Permeabilidade.....	32
2.4.5 Durabilidade.....	34
2.5 Argamassas com agregado reciclado .....	36
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>49</b>
Programa experimental.....	49
3.1 Materiais .....	49
3.1.1 Cimento.....	49
3.1.2 Cal.....	50
3.1.3 Agregado miúdo.....	51
3.1.4 Água .....	52
3.2 Métodos .....	52
3.2.1 Coleta dos agregados reciclados .....	53
3.2.2 Caracterização dos agregados .....	54
3.2.3 Produção das argamassas.....	57
3.2.4 Propriedades das argamassas no estado fresco .....	60
3.2.5 Moldagem e cura dos corpos de prova.....	61
3.2.6 Propriedade das argamassas no estado endurecido .....	62
3.2.6.1 Resistência à compressão e à tração na flexão.....	62
3.2.6.2 Módulo de elasticidade dinâmico.....	63

3.2.6.3 Absorção de água por capilaridade .....	64
3.2.6.4 Absorção de água por imersão .....	65
3.2.6.7 Resistência de aderência à tração e fissuração das argamassas de revestimento .....	66
3.2.7 Viabilidade econômica.....	68
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>69</b>
<b>Resultados e discussões.....</b>	<b>69</b>
<b>4.1 Caracterização dos agregados.....</b>	<b>69</b>
4.1.1 Caracterização física.....	69
4.1.1.1 Composição granulométrica .....	69
4.1.1.2 Propriedades físicas.....	72
4.1.1.3 Análise estatística das propriedades físicas dos AR .....	77
4.1.2 Caracterização dos finos (<0,15 mm) dos agregados.....	80
4.1.2.1 Área superficial por BET .....	80
4.1.2.2 Granulometria a laser .....	81
4.1.2.3 Formato e textura superficial por MEV .....	83
4.1.2.4 Análise química por FRX.....	85
4.1.2.5 Análise mineralógica por DRX.....	86
4.1.2.6 Atividade pozolânica .....	87
4.1.3 Teor de argamassa aderida aos grãos dos AR.....	89
<b>4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco .....</b>	<b>90</b>
4.2.1 Consumo de água .....	90
4.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	93
4.2.3 Retenção de água.....	96
<b>4.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido .....</b>	<b>98</b>
4.3.1 Resistências à compressão e à tração na flexão .....	98
4.3.2 Módulo de elasticidade .....	102
4.3.3 Absorção por capilaridade .....	104
4.3.4 Absorção por imersão .....	106
<b>4.4 Caracterização dos revestimentos.....</b>	<b>107</b>
4.4.1 Resistência de aderência à tração.....	107
4.4.2 Susceptibilidade à fissuração .....	110
<b>4.5 Viabilidade econômica .....</b>	<b>112</b>
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>114</b>
<b>Considerações finais .....</b>	<b>114</b>
5.1 Conclusões .....	114
5.2 Sugestões para estudos futuros .....	117
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>119</b>

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 2

Figura 2.1 – Total de RCD coletados no Brasil e regiões em 2013 e 2014 (toneladasx1000/ano).....	9
Figura 2.2 – Disposição irregular dos RCD no município de Natal/RN (a) em pontos clandestinos e; (b) às margens dos corpos hídricos. ....	12
Figura 2.3 – Composição média em massa dos RCD em Natal/RN .....	13
Figura 2.4 – Agregados reciclados de RCD, (a) areia reciclada e (b) brita reciclada, produzidos em uma usina de reciclagem de Campinas/SP. ....	17
Figura 2.5 – Diferentes alternativas de revestimento de argamassa de uma vedação vertical: (a) emboço + reboco + pintura (atualmente pouco utilizado); (b) camada única + pintura; (c) revestimento decorativo de monocamada (RDM) .....	19
Figura 2.6 – Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração .....	31

### Capítulo 3

Figura 3.1 – Granulometria do Cimento Portland (CP II Z).....	50
Figura 3.2 – Granulometria da cal hidratada (CH-I) .....	51
Figura 3.3 – Fluxograma geral do programa experimental.....	53
Figura 3.4 – Agregados imersos em água.....	55
Figura 3.5 – Areias recicladas utilizadas na produção das argamassas .....	58
Figura 3.6 – Ensaio de (a) consistência, (b) densidade de massa e (c) retenção de água das argamassas no estado fresco.....	61
Figura 3.7 – Ensaio de resistência à (a) tração na flexão e à (b) compressão axial .	63
Figura 3.8 – Ensaio realizados para o cálculo do módulo de elasticidade: (a) dimensões sendo medidas e (b) aferição da velocidade de propagação de onda ....	64
Figura 3.9 – Absorção de água por capilaridade das argamassas.....	64
Figura 3.10 – Execução dos revestimentos para posteriormente ser realizado resistência de aderência à tração e avaliação da fissuração .....	67

### Capítulo 4

Figura 4.1 – Curvas granulométricas das (a) areias utilizadas e das substituições do AN (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) pelo (b) AR1, (c) AR2 e (d) AR2Lav .....	70
Figura 4.2 – Coeficiente de uniformidade das areias utilizadas na produção das argamassas em função do percentual de substituição.....	71
Figura 4.3 – Teor de finos (<0,15 mm) das composições com 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de AR .....	73
Figura 4.4 – Relação entre a massa específica e a absorção dos agregados .....	76

Figura 4.5 – Distribuição normal do (a) Módulo de finura, da (b) Massa unitária, do (c) Teor de material pulverulento e da (d) Massa específica dos AR .....	77
Figura 4.6 – Granulometria dos finos do AN e AR .....	81
Figura 4.7 – Comparação das curvas granulométricas dos finos do AN e AR com os aglomerantes (cimento e cal) .....	82
Figura 4.8 – Formato e textura superficial: (a) e (b) dos AN; (c) e (d) dos AR. ....	83
Figura 4.9 – (a) grãos com argamassa aderida à superfície e (b) ampliação da região onde foi realizado o EDS.....	84
Figura 4.10 – Difratoograma da fração fina (<0,15 mm) dos AN e AR .....	87
Figura 4.11 – Gráfico do espalhamento versus relação água/materiais secos .....	90
Figura 4.12 – Densidade de massa no estado fresco das argamassas .....	93
Figura 4.13 – Teor de ar incorporado das argamassas no estado fresco .....	95
Figura 4.14 – Relação entre o coeficiente de uniformidade das composições dos agregados e o teor de ar incorporado das argamassas .....	96
Figura 4.15 – Retenção das argamassas com substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav).....	97
Figura 4.16 – Resistência à compressão das argamassas aos (a) 28 dias e (b) 91 dias com substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav) .....	99
Figura 4.17 – DRX das argamassas com AR1 aos 28 dias de cura.....	100
Figura 4.18 – Resistência à compressão das argamassas aos (a) 28 dias e (b) 91 dias com substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav) .....	102
Figura 4.19 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28 dias com substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav) .....	103
Figura 4.20 – Absorção de água por capilaridade das argamassas com (a) AR1, (b) AR2 e (c) AR2Lav em função do percentual de substituição do AN pelo AR.....	104
Figura 4.21 – (a) Absorção de água e (b) porosidade das argamassas com substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav) .....	106
Figura 4.22 – Resistência de aderência à tração das argamassas com 56 dias e com substituição de 0%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav).....	108
Figura 4.23 – Quantidade de fissuras por metro quadrado de parede revestida dos revestimentos curados a 28 dias e com substituição de 0%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav).....	111

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 2

Tabela 2.1 – Composição do RCD de algumas cidades brasileiras.....	13
--	----

### Capítulo 3

Tabela 3.1 – Composição química do cimento Portland CP II-Z-RS.....	49
Tabela 3.2 – Composição física e mecânica do cimento Portland CP II-Z-RS.....	49
Tabela 3.3 – Caracterização química e física da cal hidratada .....	51
Tabela 3.4 – Composição do AR do RCD .....	52
Tabela 3.5 – Ensaio realizados para a caracterização dos agregados .....	54
Tabela 3.6 – Consumo de materiais por m <sup>3</sup> das composições das argamassas.....	59
Tabela 3.7 – Ensaio realizados nas argamassas no estado fresco .....	60
Tabela 3.8 – Ensaio realizados para a caracterização das propriedades das argamassas e revestimentos no estado endurecido .....	62

### Capítulo 4

Tabela 4.1 – Análise granulométrica dos agregados utilizados.....	69
Tabela 4.2 – Propriedades físicas dos AN e AR utilizados.....	72
Tabela 4.3 – Dados estatístico obtidos da análise das propriedades dos AR .....	78
Tabela 4.4 – Área superficial dos finos do AN e AR.....	80
Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de granulometria a laser dos finos .....	81
Tabela 4.6 – Composição química por FRX dos agregados .....	85
Tabela 4.7 – Índice de desempenho das argamassas de cimento e cal com o AR ..	88
Tabela 4.8 – Resultados do ensaio de teor de argamassa dos AR.....	89
Tabela 4.9 – Consumo de água para atingir o espalhamento requerido .....	91
Tabela 4.10 – Coeficientes de capilaridade das argamassas produzidas com os três tipos AR em função do percentual de substituição do AN.....	104
Tabela 4.11 – Umidade e forma de ruptura dos corpos de prova dos revestimentos .....	109
Tabela 4.12 – Custo para a produção de 1 m <sup>3</sup> de argamassa .....	112

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
a/c	água/cimento
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
AN	Agregado natural ou areia natural – à depender do contexto
AR	Agregado reciclado ou areia reciclada – à depender do contexto
AR1	Areia reciclada com grãos inferiores a 4,75 mm
AR2	Areia reciclada com dimensões limitadas entre 2,36 e 0,15 mm
AR2Lav	Areia reciclada lavada
ARC	Agregado reciclado de concreto
ARM	Agregado reciclado misto
CH	Cal hidratada
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
hab	Habitante
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
PMN	Prefeitura Municipal de Natal
RCC	Resíduo de construção civil
RCD	Resíduo de construção e demolição
RN	Rio Grande do Norte
URBANA	Companhia de Serviços Urbano de Natal

## CAPÍTULO 1

# Introdução e relevância da pesquisa

A construção civil pode ser considerada uma das indústrias que mais contribui para alterar o meio ambiente (SILVA; BRITO; DHIR, 2015; MUÑOZ-RUIPEREZ *et al.*, 2016; KISKU *et al.*, 2017). Desde os seus primórdios, já se geravam grandes impactos ambientais no planeta, provocados pela transformação do ambiente natural. Com o rápido desenvolvimento urbano e o crescimento dessa indústria, houve um aumento considerável do consumo dos recursos naturais, incluindo água e energia, além da quantidade de resíduos sólidos gerados e a emissão de gases poluentes.

A grande massa de materiais produzidos pela construção civil, que gira em torno de 4 a 7 toneladas por habitante a cada ano (AGOPYAN; JOHN, 2011), juntamente com os elevados índices de perdas, fazem dessa indústria, além de uma grande produtora de materiais, uma grande geradora de resíduos (LE *et al.*, 2016), que por sua vez, implica no desperdício dos recursos naturais.

No Brasil, estima-se que a produção de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), apesar de variável e ter correlação com Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), é superior a 70 milhões de toneladas por ano (cerca de 500 kg/habitantes a cada ano), representando mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (CONTRERAS *et al.*, 2016). Especificamente, na região metropolitana de Natal/RN, no ano de 2015, foram coletados pela Companhia de Serviços Urbano de Natal (URBANA, 2016), cerca de 146 mil toneladas de RCD.

A disposição inadequada desses resíduos, na natureza, agrava ainda mais esse cenário, visto que normalmente, as soluções empregadas para os problemas de sua grande geração, bem como, a falta de espaço e/ou soluções que absorvam toda essa produção, são os aterros ou lixões, que possuem vários inconvenientes ambientais e cada vez se tornam mais caros devido à escassez de espaço (BOURSCHEID; SOUZA, 2010), contribuindo, portanto, para que esses resíduos sejam dispostos em terrenos baldios e às margens de rios e estradas.

Como consequência, o meio ambiente sofre diversos problemas ambientais, tais como assoreamento de rios e lagos, entupimento de sistemas de drenagem

urbana (ocasionando inundações), degradação das paisagens urbanas (poluição visual), proliferação de vetores nocivos à saúde humana, além de inúmeros problemas sociais, visto que a sua remoção implica em elevados custos para os municípios (MIRANDA, 2010; CABRAL *et al.*, 2010; MORETTI *et al.*, 2016).

A fim de evitar estes problemas, a reciclagem surge com uma boa alternativa para gerenciar esses resíduos. Levy (2010) comenta que a partir de 1946, iniciou-se o desenvolvimento de tecnologias visando reciclagem dos RCD, impulsionados pela crescente preocupação com as questões ambientais. No Brasil, segundo Santana, Carneiro e Sampaio (2001), o interesse pela reciclagem de RCD para serem utilizados em materiais de construção, começou apenas na década de 80.

Entretanto, Agopyan e John (2011) mencionam que as medidas mais consistentes são do início da década de 90, a partir de estudos sistemáticos e mensuráveis, como a reciclagem e redução de perdas e do consumo de energia. A exemplo disso, em 1992 na Conferência Mundial do Meio Ambiente que ocorreu no Rio de Janeiro, foi elaborada a Agenda 21, cujo principal objetivo foi alertar a todos os setores da construção civil sobre os problemas ambientais decorrentes, assim como da necessidade emergencial de ações eficazes para combatê-los.

Atualmente, o esforço e a conscientização da sociedade brasileira têm levado à aceitação e conseqüente utilização de produtos reciclados provenientes dos resíduos de construção civil. Assim, é cada vez mais comum a reciclagem e o reuso dos resíduos originados dessas e de outras indústrias, para a produção de componentes a serem utilizados na própria construção civil. Embora as técnicas de reciclagem dos RCD tenham evoluído, não se pode afirmar com absoluta certeza que a reciclagem tenha se tornado uma ideia amplamente difundida (LEVY, 2010).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da resolução nº 307 de 2002, estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a geração dos RCD, de forma a incentivar a reciclagem e, sobretudo, minimizar os impactos ambientais. A recente política nacional dos resíduos sólidos contempla esse quadro, reforçando a responsabilidade dos fabricantes em realizar a gestão dos resíduos.

Um dos grandes desafios atuais é colocar a resolução em operação, principalmente nas grandes cidades, visto que os processos que envolvem a ampla e complexa cadeia produtiva da construção civil, são influenciados por normas técnicas,

códigos de obra, planos diretores e políticas públicas, que dependem de soluções em todos os níveis (usuários diretos, cidadãos, empresas e órgãos governamentais), articuladas dentro de uma visão sistêmica. Esses documentos, muitas vezes, limitam a liberdade de eleger soluções, dificultando assim, as inovações. Todavia, possuem um enorme potencial de incentivar e orientar o setor a adotar soluções mais sustentáveis (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Para Vázquez (2001) a construção sustentável baseia-se na prevenção e redução dos resíduos através do desenvolvimento de tecnologias limpas no uso de materiais recicláveis ou reutilizáveis, no uso dos resíduos como materiais secundários, bem como na coleta e deposição. Uma das possíveis medidas para a aplicação deste conceito, implica no reaproveitamento dos RCD como agregado reciclado (AR), com o intuito de promover uma destinação adequada para esses resíduos e aumentar a vida útil dos aterros sanitários (JOHN, 2000).

### **1.1 Justificativa**

Sabe-se que a construção civil é uma das indústrias que mais consomem matérias primas naturais, sendo responsável pelo consumo de cerca de 40% dos recursos da natureza (KULATUNGA; AMARATUNGA; HAIGH, 2006). No Brasil, cerca de 1/3 dos recursos naturais são destinados a produção de materiais cimentícios (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Os agregados, por exemplo, representam um grande volume na composição de concretos e argamassas, variando de 60 a 80% e, isso representa, uma grande demanda por recursos naturais, tornando-se responsáveis por elevados impactos ambientais decorrentes das atividades de extração e produção desses materiais.

No Brasil, estima-se que o consumo de agregados gira em torno de 632 milhões de toneladas, o que corresponde a cerca de 3,31 toneladas por habitantes (ANEPAC, 2010). Em particular, pode-se citar os agregados miúdos que, em 2013, atingiram um consumo de aproximadamente 377 milhões de toneladas (DNPM, 2014). Estima-se ainda, que 90% da areia consumida no país é extraída de leitos de rios (ALMEIDA; LUZ, 2009), constituindo-se um forte impacto ambiental que pode causar, além de outros danos ao meio ambiente, a modificação do equilíbrio biológico (RODRIGUES *et al.*, 2013) e da microbiota do solo (LELLES *et al.*, 2005).

Não obstante a isso, outros fatores justificam a utilização da areia reciclada (AR). Por exemplo, na produção de agregados graúdos reciclados, a fração miúda é involuntariamente produzida, o que representa uma grande quantidade do peso dos RCD processados (RESTUCCIA *et al.*, 2016) que, em geral, corresponde a cerca de 40% (ÂNGULO *et al.*, 2005); Além disso, atualmente, a reciclagem da fração mista (basicamente argamassa e material cerâmico), foi estuada em menor grau, quando comparada com a fração cinza (concreto), contribuindo ainda mais para a problemática que envolve a geração e destinação dos RCD, visto que uma grande quantidade desses tipos de resíduos/AR são armazenados nas usinas sem alternativas para sua recuperação (LEDESMA *et al.*, 2015).

Deste modo, diante dos impactos causados ao meio ambiente promovidos pela construção civil, as práticas sustentáveis, os incentivos governamentais e a crescente preocupação com o meio ambiente são de fundamental importância para que os impactos negativos para o planeta sejam minimizados.

A argamassa, quando comparada ao concreto, é considerada um material construtivo menos nobre (PEREIRA; EVANGELISTA; BRITO, 2012). Em consequência disto, é dada uma menor atenção na literatura quando se analisa as propriedades de argamassas com AR (SAMIEI *et al.*, 2015), logo ocorre um crescente interesse na utilização de RCD em argamassas em substituição aos agregados naturais (AN) (MIRANDA, 2000; MIRANDA, 2005; CORINALDESI; MORICONI, 2009; LIMA; LEITE, 2012; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; FERRO *et al.*, 2015; LEDESMA *et al.*, 2015; SAMIEI *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2015; LE *et al.*, 2016; MARTÍNEZ *et al.*, 2016; MUÑOZ-RUIPEREZ *et al.*, 2016; RESTUCCIA *et al.*, 2016; SILVA; BRITO; DHIR, 2016), sobretudo porque estas argamassas não desempenham função estrutural e seus requisitos mecânicos são menos rigorosos, uma vez que seu comportamento depende muito mais da aderência de ligação entre o tijolo e argamassa do que das propriedades mecânicas intrínsecas da argamassa (MORICONI; CORINALDESI; ANTONUCCI, 2003).

Nota-se ainda, que a fração de finos (grãos menores do que 0,15 mm) das AR influenciam negativamente as propriedades das argamassas (MIRANDA; SELMO, 2006; JUAN; GUTIÉRREZ, 2009; MARTÍN-MORLAES *et al.*, 2011; SILVA; BRITO; DHIR, 2014; ZHAO *et al.*, 2015; RESTUCCIA *et al.*, 2016). Dessa forma, com o objetivo de melhorar a sua qualidade, alguns autores recomendam a sua britagem e

lavagem (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2013; DI MARIA *et al.*, 2016). Para Miranda, Ângulo e Careli (2009) este último processo é viável, tanto do ponto de vista técnico (eliminar os finos) quanto econômico (chega a 5% do custo total da usina).

Miranda (2000) recomenda que a AR deve ser limitada entre 2,36 e 0,15 mm e, ainda, a utilização de um plastificante, o que justifica também a utilização de cal hidratada neste trabalho e, ainda, pelo fato de ser um aglomerante pouco utilizado em argamassas com AR.

Nesse sentido, a incorporação de AR provenientes de RCD em argamassas, sugere um caminho para indústria da construção civil bastante compatível com a conotação sustentável, pois promove impacto positivo no meio ambiente, provocado pela retirada dos grandes volumes de resíduos que são descartados inadequadamente na natureza, e ainda, pela diminuição do uso dos recursos naturais e por fornecer substitutos para os AN.

## **1.2 Objetivos da Pesquisa**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da utilização de AR, com diferentes composições granulométricas e em condição lavada, nas propriedades de argamassas de revestimento.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- i. Avaliar as propriedades físicas e químicas dos AR em comparação aos AN;
- ii. Analisar a variabilidade da produção dos AR, com base em suas propriedades físicas;
- iii. Avaliar as propriedades físicas, químicas, microscópicas, mineralógicas e mecânicas dos finos dos AN e dos AR;
- iv. Verificar influência da incorporação de AR com diferentes granulometrias e na condição lavada, nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido;

- v. Analisar qual o tipo de AR estudado apresenta viabilidade técnica e econômica produção das argamassas de revestimento, objetivando a redução da fissuração e aumento do potencial de aderência dos revestimentos.

## CAPÍTULO 2

# Fundamentação teórica

### 2.1 Resíduos de construção e demolição (RCD)

Os resíduos da construção civil (RCC), intitulados neste trabalho de resíduos de construção e demolição (RCD), são gerados durante toda a vida útil da construção: execução, manutenção, reforma, desocupação e demolição (CASSA *et al.*, 2001), o que justifica a denominação de RCD (PINTO, 1999), uma vez que a grande maioria dos RCC são originados destas atividades. Esses resíduos, comumente chamados de entulho, são geralmente, considerados como material inerte, constituindo, quase sempre, a maior parcela dos resíduos sólidos urbanos (CARNEIRO *et al.*, 2001).

Segundo a Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002, do CONAMA os RCD constituem-se nos resíduos que são gerados nas atividades de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluindo os resultantes da preparação e escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiações elétricas, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Os RCD são considerados inertes, conforme a NBR 10.004 (2004), ou seja, não reagentes em condições normais. Contudo, em sua grande maioria se submetidos à análise, certamente, estariam classificados como não inertes, sobretudo devido ao seu pH e dureza da água absorvida e em alguns casos eles podem conter contaminações oriundas tanto da fase de uso da construção quanto do seu manuseio posterior (JOHN; AGOPYAN, 2000).

#### 2.1.1 Classificação

O CONAMA, qualifica, por meio da Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), os RCD em quatro classes. A Resolução nº 348 (CONAMA, 2004), passou a incluir o amianto na Classe “D” (resíduos perigosos). A Resolução nº 431 (CONAMA, 2011), altera a redação dos resíduos Classes B e C. E, mais recentemente, a Resolução nº

469 (CONAMA, 2015), altera a redação dos resíduos Classe B, incluindo as embalagens de tintas e vernizes, conforme pode ser observado a seguir:

- **I – Classe A:** são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de demolição, de construção, reformas e reparos de edificações (componentes cerâmicos, como tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento); de processo de fabricação e/ ou demolição de peças pré-moldadas em concretos (blocos, tubos, meios-fios), produzidas nos canteiros de obras;
- **II – Classe B:** são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- **III – Classe C:** são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- **IV – Classe D:** são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

### 2.1.2 Geração e deposição final do RCD

Nos últimos anos, em consequência do crescimento urbano, do déficit habitacional (pressiona a sociedade a expandir o número de habitações) e o alto índice de perdas, a quantidade de resíduos gerados pela construção civil também aumentou consideravelmente (CARNEIRO *et al.*, 2001), chegando a representar, apesar de estimativas variáveis, mais 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1999; JOHN, 2001; ÂNGULO, 2005).

Tipicamente, encontra-se na bibliografia internacional estimativas da geração de RCD que variam de 400 a 500 kg/hab.ano, valor igual ou superior à massa de lixo urbano (JOHN, 2001). Na União Europeia, por exemplo, a produção anual de RCD pode chegar a mais de 180 milhões de toneladas (CORINALDESI, 2012).

No Brasil, não existem estudos sistemáticos à cerca da geração desses resíduos. Todavia, Pinto (1999) em 6 municípios brasileiros pesquisados, estimou que o RCD corresponde de 54% a 74% dos resíduos sólidos urbanos, representando uma geração per capita entre 0,4 e 0,76 toneladas por habitante/ano. Contreras *et al.* (2016) cita que atualmente a produção de RCD no Brasil é superior a 70 milhões de toneladas e representa a maior quantidade de resíduos sólidos urbanos (em massa).

Segundo a ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014), em 2014, foram coletados em 400 municípios brasileiros, aproximadamente 45 milhões de toneladas de RCD, o equivalente a 0,22 toneladas/hab.ano, implicando em um aumento de 4,1% em relação a 2013, como pode ser observado na Figura 2.1. Esse cenário, também observado em anos anteriores, exige atenção especial quanto a destinação final dada aos RCD, visto que a quantidade total desses resíduos é ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos.

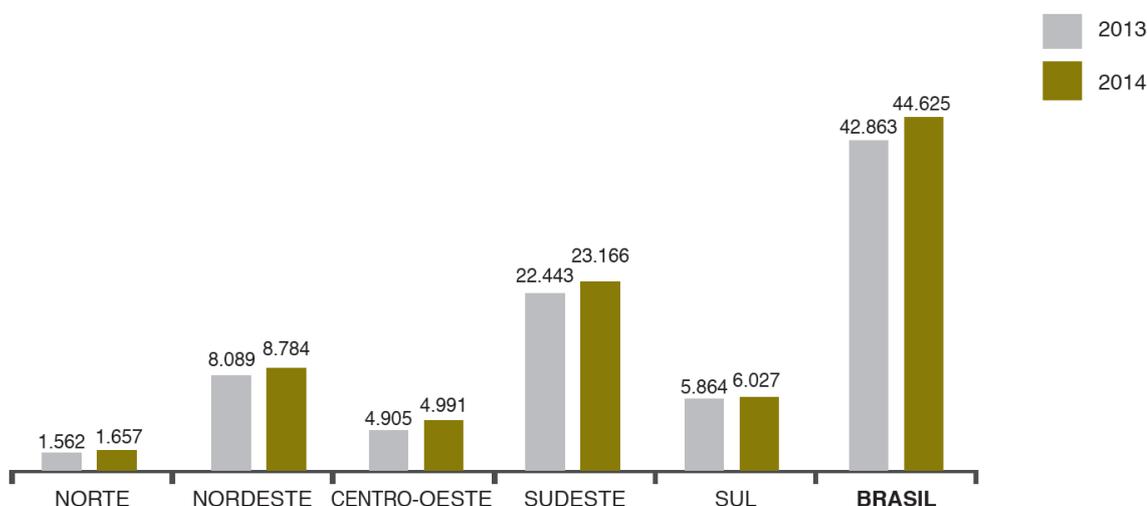


Figura 2.1 – Total de RCD coletados no Brasil e regiões em 2013 e 2014 (toneladasx1000/ano)

Fonte: ABRELPE (2014).

Na região metropolitana de Natal/RN, no ano de 2013, foram coletados pela URBANA cerca de 370 mil toneladas de resíduos sólidos, incluindo os domiciliares, construção civil, podaço, serviços de saúde e coleta seletiva. No tocante aos resíduos provenientes da construção civil, foram coletados em torno de 103 mil toneladas. A coleta, transporte e disposição final desses resíduos é de responsabilidade do próprio gerador. Os resíduos coletados por empresas

especializadas são encaminhados para as usinas de reciclagem particulares, como as existentes nos municípios de São Gonçalo do Amarante e São José de Mipibú (PMN, 2015).

Ainda segundo informações da URBANA (2016), em 2015, foram coletadas aproximadamente 146 mil toneladas de RCD, um aumento de cerca de 40% em relação ao ano anterior. Atualmente, a coleta desses resíduos é realizada em pontos clandestinos (espalhados por toda região metropolitana), em três ecopontos (recebem pequenas quantidades, até 1 m<sup>3</sup>) e por meio de coleta especial (que pode ser solicitada pelos munícipes mediante ao pagamento de uma taxa).

Nos dias de hoje, o que se pode assegurar, além dos vastos impactos ambientais causados pela geração e destinação dos RCD, é como esses resíduos são originados. John e Agopyan (2000) citam que os RCD são gerados em vários momentos do ciclo de vida das construções, dentre eles:

- **Fase de construção (canteiro de obras):** decorre das perdas dos processos construtivos, onde parte permanece incorporada nas construções na forma de componentes com dimensões finais superiores àquelas projetadas (argamassa de revestimento, concretos, etc.) e outra parcela vai se converter em resíduo de construção;
- **Fase de manutenção/reforma:** está associado a geração na fase de manutenção que decorre de vários fatores, como a correção de defeitos (patologias); reformas ou modernização do edifício; descarte de componentes que tenham degradado e atingindo o final da vida útil e por isso necessitam ser substituídos;
- **Demolição dos edifícios:** corresponde aos resíduos causados pela demolição dos edifícios. A redução desses resíduos depende do prolongamento da vida útil dos edifícios e seus componentes, que depende da tecnologia de projeto e de materiais; da existência de incentivos para modernização e não demolições; e por fim depende da tecnologia de projeto e demolição/desmontagem que permita que os componentes sejam reutilizados.

Pinto (1999) verificou, que nas grandes cidades brasileiras, as atividades de canteiro de obras são responsáveis por aproximadamente 50% dos RCD, enquanto que a atividade de demolição e manutenção são responsáveis pela outra metade.

As perdas que ocorrem devido ao desperdício de materiais durante a construção de uma edificação são as grandes responsáveis pela geração de RCD (CABRAL; MOREIRA, 2011). Incluem ainda, as demolições e as reformas, que promovem a eliminação de diversos componentes durante a utilização ou após o término do serviço (CASSA *et al.*, 2001).

Na fase de construção, o RCD gerado em uma edificação é composto pelas sobras dos materiais adquiridos e danificados ao longo do processo produtivo, tais como restos de concretos e argamassa produzidos e não utilizados, ao final do dia de trabalho, alvenaria demolida, argamassa que cai durante a aplicação e não é reaproveitada, sobras de tubos, aço, eletrodutos, entre outros (CASSA *et al.*, 2001).

Esse elevado percentual de resíduos gerados nas atividades de execução, deve-se a própria tecnologia das construções como os materiais, equipamentos e a capacitação de mão de obra. Nas construções convencionais, por exemplo, onde se constroem os elementos no próprio local (fundações, vigas, pilares, lajes, paredes, revestimentos, etc.), o desperdício é maior e pode chegar a 30% do material bruto aplicado na obra (BOURSCHEID; SOUZA, 2010).

No Brasil, nos últimos anos, diversas empresas implementaram programas de redução de perdas e gestão de qualidade, com o intuito de reduzir a geração e realizar o adequado gerenciamento dos resíduos. Contudo, se faz necessário ainda, a implantação de tecnologias visando à reciclagem e a reutilização, pois a quantidade de entulho gerado pelas obras de construção, demolição ou reformas continuará a ser significativa, mesmo com a implantação de programas de redução de perdas (CARNEIRO *et al.*, 2001).

Do ponto de vista ambiental, além dos grandes volumes produzidos, outro grande problema é a disposição irregular dos RCD na natureza, que normalmente, é feita de forma inadequada em áreas livres (comumente localizadas em regiões periféricas) e aterros inertes (também denominados de “bota-foras”). Constitui ainda, um problema mais significativo, o inevitável e rápido esgotamento das áreas designadas para deposição (PINTO, 2001).

A inadequada disposição dos RCD, compromete a paisagem do local; o tráfego de pedestres e de veículos; provoca assoreamento dos rios, córregos e lagos; o entupimento da drenagem urbana, ocasionando as enchentes; além de servirem de

pretexto para o depósito irregular de outros resíduos não-inertes, proporcionando o surgimento e a multiplicação de vetores de doenças (CABRAL *et al.*, 2010; CABRAL; MOREIRA, 2011). No município de Natal/RN, por exemplo, é comum encontrar pelas ruas da cidade pontos de disposição irregular dos resíduos de construção e demolição, como pode ser observado na Figura 2.2 (PMN, 2015).



Figura 2.2 – Disposição irregular dos RCD no município de Natal/RN (a) em pontos clandestinos e; (b) às margens dos corpos hídricos.

Fonte: PMN (2015).

Cassa *et al.* (2001) comentam que se por um lado, o RCD acarreta em desperdício de recursos para a fonte geradora, por outro lado, acarreta também gastos para administração pública, que, por sua vez, acaba arcando com os custos de disposição final e, em alguns casos, de transporte desse resíduo. Além disso, a grande quantidade de pontos clandestinos de descarga e a dificuldade de coletar o resíduo através do mesmo sistema operação utilizado para coletar o lixo domiciliar, contribuem para o aumento dos problemas ambientais decorrentes da geração dos RCD.

Os RCD têm constituição variável (CONTRERAS *et al.*, 2016; DI MARIA *et al.*, 2016), e vai depender da fonte geradora (construção ou reforma/demolição), da fase da obra, tecnologia construtiva, natureza da obra, etc. (JOHN, 2000). Entretanto, a composição dos RCD em algumas cidades mostra-se ser basicamente de concreto, argamassa e material cerâmico, correspondendo a mais de 60% do total de resíduos gerados, como observado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição do RCD de algumas cidades brasileiras

% em massa	Salvador (BA) <sup>1</sup>	Maceió (AL) <sup>2</sup>	Porto Alegre (RS) <sup>3</sup>	Fortaleza (CE) <sup>4</sup>
Concreto	53,0	27,82	44,2	15,0
Argamassa	53,0	18,65	18,3	38,0
Cerâmica vermelha	9,0	48,15	35,6	13,0
Cerâmica Branca	5,0	3,06	0,10	11,0
Solo e areia	22,0	-	1,80	9,0
Rocha	5,0	-	-	3,0
Plástico	4,0	-	-	-
Outros	2,0	2,32	-	2,0

Fonte: Adaptado de <sup>1</sup>Carneiro *et al.* (2001); <sup>2</sup>Vieira (2003); <sup>3</sup>Lovato (2007); <sup>4</sup>Oliveira *et al.* (2011).

Silva Filho (2005) identificou que os principais constituintes do RCD de Natal/RN são: concreto, argamassa e pedras naturais, correspondendo a 63,3%. Em seguida, têm-se os resíduos de produtos cerâmicos e madeira, com 28,9% e 3,4%, respectivamente, do total do RCD descartado (Figura 2.3).

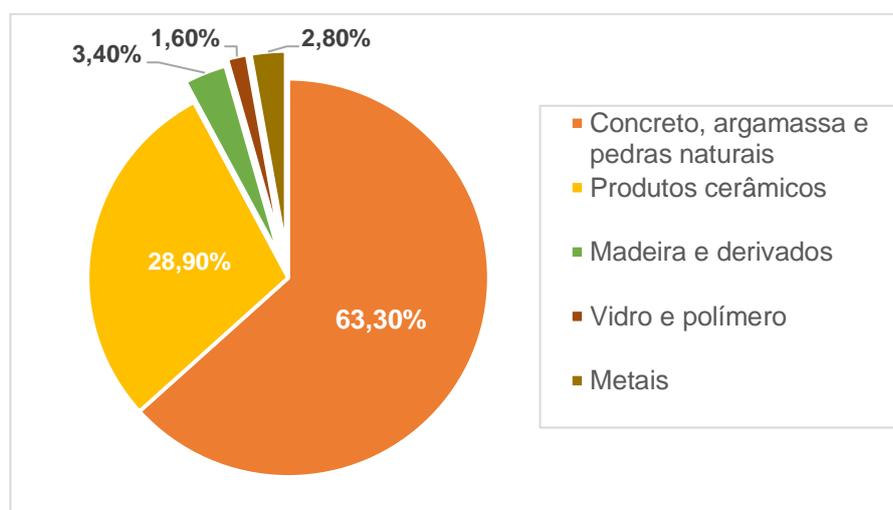


Figura 2.3 – Composição média em massa dos RCD em Natal/RN

Fonte: Adaptado de Silva Filho (2005).

Observa-se então, que a composição dos RCD nas cidades brasileiras, possuem grande potencial de reciclagem, visto que os seus principais constituintes (concreto, argamassa e materiais cerâmicos) pertencem à Classe A, isto é, são potencialmente recicláveis como agregados.

É importante destacar que, habitualmente, pode-se encontrar outros materiais na composição dos RCD, tais como o asfalto, plástico, madeira borracha, vidro e etc. Estes materiais são considerados como contaminantes e têm limites rígidos para seu conteúdo (SILVA; BRITO; DHIR, 2016). Por conseguinte, podem afetar a resistência

e a durabilidade dos materiais produzidos, como por exemplo: pasta endurecida de cimento e gipsita; alto teor de álcalis presente em vidros triturados; expansão excessiva devido a reação de metais como soluções alcalinas; papel e rejeitos orgânicos que causam problemas de pega e endurecimento. Além disso, se forem utilizados AR oriundos de RCD de obras expostas à atmosfera marinha, existe a possibilidade de contaminação por sais que, dependendo da situação, pode levar a corrosão de metais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Dessa forma, é de extrema importância realizar a adequada triagem e seleção dos RCD no próprio canteiro de obras e nas usinas de reciclagem, de modo a obter apenas os resíduos pertencentes a Classe A, visto que os contaminantes, segundo John e Agopyan (2000), afetam tanto a qualidade técnica do produto contido o reciclado, como podem significar riscos ambientais.

### **2.1.3 Reutilização dos RCD como agregado reciclado**

Segundo John (2000) “a reciclagem é essencial para o desenvolvimento sustentável, uma vez que é impossível pensar em uma sociedade que não gere resíduos”. Assim, a reciclagem dos RCD é viável do ponto de vista técnico e ambiental, pois o risco de contaminação ambiental por este tipo de reciclagem pode ser considerado baixo, embora seja necessário um controle mínimo, especialmente quando se trata de RCD provenientes de instalações industriais (JOHN; AGOPYAN, 2000).

Nesse contexto, em meio aos problemas ambientais decorrentes da geração dos RCD, surge a necessidade de buscar novas alternativas e tecnologias que permitam a reciclagem desses materiais. Para John (2001) o próprio setor da construção civil possui grande potencial para incorporar novos materiais, pois além de ser o maior responsável pela geração de resíduos, é também grande responsável pela reciclagem no Brasil e na maioria dos países.

A reciclagem dos resíduos permite, então, visualizar importantes ganhos, tanto economicamente como ambientalmente. A incorporação de resíduos na produção de materiais também pode reduzir o consumo de energia, não apenas pelo fato desses produtos frequentemente demandarem grandes quantidades de energia, mas, também, porque se podem reduzir as distâncias de transporte de matéria prima. Se, em alguns casos, a reciclagem significa redução de custos e até mesmo novas

oportunidades de negócios, a cadeia produtiva que recicla reduz o volume de extração de matérias-primas, preservados os recursos naturais limitados. Além disso, a incorporação dos resíduos permite muitas vezes a produção de matérias com melhores características técnicas (JOHN, 2001).

De tal modo, o estímulo à reciclagem dever ser uma porta importante de qualquer política ambiental, pois essa prática é viável tanto pelos aspectos técnicos (simplicidade operacional e grande aplicabilidade), quanto pelos aspectos econômicos, visto que os investimentos para a implantação de um programa de reciclagem de RCD são relativamente pequenos (CASSA *et al.*, 2001).

Uma boa alternativa é a reciclagem dos RCD como agregado para a produção de concretos, pavimentos e argamassas. A NBR 15116 (2004) estabelece os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos de construção civil. Define-os, ainda, como materiais granulares, originados do processo de beneficiamento dos RCD, que apresentam características técnicas para serem aplicados em obras de edificação e infraestrutura. E classifica-os, em dois tipos: agregado reciclado de concreto (ARC), cujo teor de fragmentos à base de cimento e rochas é maior que 90%; e agregado reciclado misto (ARM), cujo teor é menor que 90%.

Portanto, os AR de RCD, podem ser definidos, em função de sua origem, como materiais muito heterogêneos, cuja composição dependerá da categoria do trabalho (construção ou demolição) (CONTRERAS *et al.*, 2016; LLATAS, 2013), da tipologia da edificação, dos materiais empregues (MARTÍNEZ *et al.*, 2013), da localização geográfica, uma vez que estaria relacionado com os recursos geológicos e com as tecnologias de construção utilizadas (RODRIGUES *et al.*, 2013).

A utilização dos AR varia conforme a sua aplicação. John e Agopyan (2000) mencionam que as frações que são compostas, predominantemente, de concretos estruturais e de rochas naturais podem ser recicladas como agregados para a produção de concretos com função estrutural. Entretanto, a presença de fases mais porosas e de menor resistência mecânica, como é o caso de agregados mistos (argamassas e produtos de cerâmica vermelha e de revestimento), provoca uma redução da resistência dos agregados e um aumento de sua absorção de água e, conseqüentemente, sua utilização é limitada à concretos de menor resistência como blocos de concreto, contrapisos, camadas drenantes, como também a produção em

argamassas em canteiro. Muñoz-Ruiperez *et al.* (2016) citam que os agregados obtidos a partir de concreto reciclado apresentaram um desempenho melhor do que o ARM.

As usinas de beneficiamento dos RCD são responsáveis por produzir os AR. Na prática, essas usinas normalmente classificam a fração mineral conforme a coloração em: cinza (visualmente predominante de componentes de construção de natureza cimentícia, empregada em calçadas, blocos de concreto e outros) e vermelha (visualmente predominante de componentes de construção de natureza cerâmica, especialmente do tipo vermelha, empregada em atividades de pavimentação) (ÂNGULO, 2005).

Observa-se, nos últimos anos, o crescente número de usinas de reciclagem implantadas em diversos municípios brasileiros, algumas geradas pela iniciativa privada, outras pelo poder público. Esse aumento significativo de usinas de reciclagem ocorreu após a criação da Resolução nº 307 do CONAMA (MIRANDA, 2010). No entanto, a capacidade brasileira de produção de AR está muito abaixo da geração de RCD em todo o país (MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009).

Essas usinas produzem AR de todas as frações granulométricas para serem utilizados na execução de pavimentos, em elementos pré-moldados, na produção de concretos sem fins estruturais e na substituição parcial do AN (LEVY, 2010). O processamento dos RCD nas usinas de reciclagem para a obtenção desses agregados, deve ser bastante simplificado, cumprindo-se um fluxo de seleção e descontaminação, trituração (com possível classificação) e expedição, já transformados em nova matéria prima a ser utilizada em serviços e obras da construção civil (PINTO, 2001).

Basicamente, os equipamentos utilizados para a instalação de uma usina de reciclagem são: britador, peneira e esteira (CABRAL; MOREIRA, 2011). Quanto ao processo de reciclagem, os métodos utilizados nas usinas brasileiras é bem semelhante e normalmente envolve, a separação dos componentes não minerais do RCD (madeira, plásticos, metais, papelão e etc.) e a consequente britagem de sua fração mineral (MIRANDA, 2010).

Após a britagem, os AR são originados, de acordo com a granulometria que se deseja. A Figura 2.4 ilustra AR miúdos e graúdos produzidos em Campinas/SP.



Figura 2.4 – Agregados reciclados de RCD, (a) areia reciclada e (b) brita reciclada, produzidos em uma usina de reciclagem de Campinas/SP.

Fonte: Levy (2010).

Cabe ressaltar que, produzir AR bem graduados e limpos não é fácil e nem suficiente para garantir a qualidade do processo de reciclagem. É preciso, a princípio, definir para qual finalidade específica será destinado esse material, ou seja, suas propriedades deverão atender aos limites impostos pelas normas, para que assim, os concretos e as argamassas produzidos possam ser duráveis (LEVY, 2001).

Uma forma de melhorar a qualidade do AR e potencializar a sua reciclagem, é a realização da triagem no próprio canteiro de obras, o que garante que a fração Classe A não seja contaminada por gesso, solo, matéria orgânica, etc., reduzindo assim os impactos ambientais como a emissão de poluentes, consumo de energia e custos envolvidos no transporte (MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009). Isso demonstra a importância da gestão dos resíduos no próprio canteiro de obras, pois, evita que os AR sejam contaminados, garantindo assim, materiais de construção civil de melhor qualidade (BARROS, 2012).

As normas não garantem a homogeneidade dos AR, nem sua aceitação no mercado. Para tanto, é necessário implantar um controle de qualidade na produção dos AR – que por sinal tem custo baixo, com o intuito de reduzir a variabilidade e de melhorar a qualidade e a confiabilidade do produto. Algumas estratégias permitem produzi-los com maior qualidade, dentre elas a utilização de um classificador espiral para remover a fração orgânica leve e os finos (MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009).

Silva, Brito e Dhir (2014) relatam que apesar da reciclagem ser a melhor maneira de gerenciar os RCD, existem ainda, alguns obstáculos que impedem à utilização de AR na indústria da construção, como por exemplo:

- A falta de confiança dos clientes e prestadores de serviço;
- Incerteza quanto aos seus benefícios ambientais;
- Ausência de normas e especificações acessíveis aos usuários que utilizarão estes agregados;
- Baixa qualidade do produto final, devido à falta de conhecimento e/ou interesse dos proprietários das usinas de reciclagem;
- Distância entre os locais de construção/demolição e as usinas de reciclagem;
- Deficiência de fornecimento de AR de boa qualidade que satisfaçam a demanda existente.

## **2.2 Argamassas de revestimento**

As alvenarias e os revestimentos argamassados são tecnologias construtivas que, na sua essência, remetem seu uso desde a Idade Média. Inicialmente, as alvenarias eram utilizadas simultaneamente como vedações e como estrutura, sendo construídas, em sua grande maioria, por tijolos de origem cerâmicas assentados e revestidos com argamassa proveniente da mistura de cal e areia. Com o advento do cimento Portland, as argamassas sofreram uma evolução, visto que a adição desse material, trouxe melhorias para a resistência e aderência às bases, já nas primeiras idades (CEOTTO; BANDUK; NAKAKURA, 2005).

A NBR 7200 (1998) define argamassa de revestimento como sendo uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes e água, podendo conter ou não aditivos/adições, com propriedades de aderência e endurecimento. A NBR 13281 (2005) acrescenta ainda, que estas argamassas podem ser dosadas em obra ou em instalações próprias (argamassas industrializadas). Quanto ao tipo, as argamassas utilizadas para revestimento podem ser à base de cal, à base de cimento ou argamassas mistas de cal e cimento (ABCP, 2003).

Carasek (2010) menciona que argamassas de revestimento são utilizadas para revestir paredes, muros e tetos, nos quais, comumente, recebem acabamentos

diversos, como pintura, revestimentos cerâmicos, laminados, etc. Os revestimentos de argamassa, por sua vez, podem ser constituídos por várias camadas e funções específicas, conforme descrito a seguir e ilustrado na Figura 2.5:

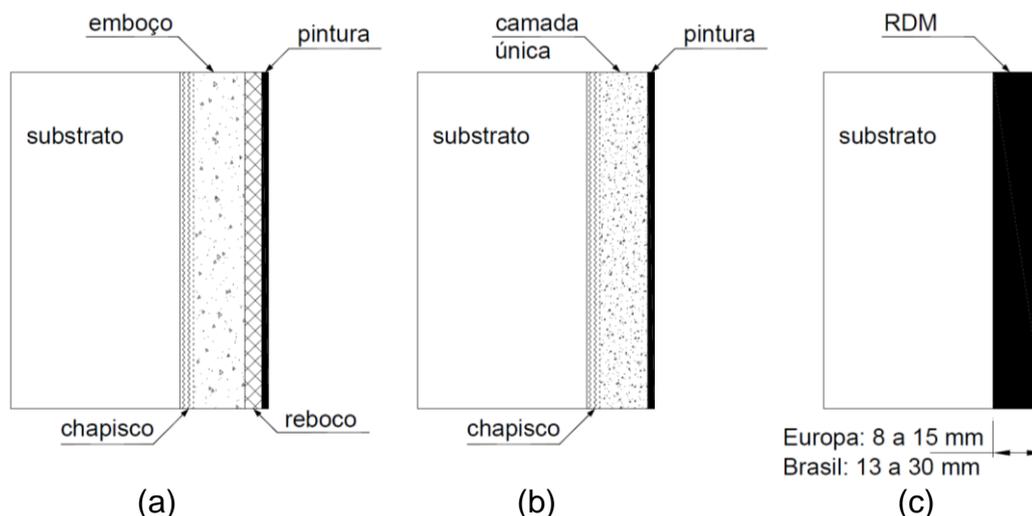


Figura 2.5 – Diferentes alternativas de revestimento de argamassa de uma vedação vertical: (a) emboço + reboco + pintura (atualmente pouco utilizado); (b) camada única + pintura; (c) revestimento decorativo de monocamada (RDM)

Fonte: Carasek (2010).

- **Chapisco:** camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou descontínua, com finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e também melhorar a aderência do revestimento;
- **Emboço:** camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a base, proporcionando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo (cerâmica, por exemplo);
- **Reboco:** camada de revestimento utilizada para cobrimento do emboço, com o objetivo de proporcionar uma superfície que permita receber o revestimento decorativo (por exemplo, pintura) ou que se constitua no acabamento final. A NBR 13749 (2013), estabelece espessuras para revestimento interno (5 a 20 mm) e externo (20 a 30 mm) de paredes e tetos (no máximo 20 mm);
- **Camada única:** Revestimento de um único tipo de argamassa aplicado à base, sobre o qual é aplicada uma camada decorativa, como, por exemplo, a pintura; também chamado popularmente de “massa única” ou “reboco paulista”. Esse tipo de revestimento é atualmente a alternativa mais empregada no Brasil;

- **Revestimento decorativo monocamada:** Trata-se de um revestimento aplicado em uma única camada, que faz, simultaneamente, a função de regularização e decorativa, muito utilizado na Europa.

Nos revestimentos constituídos por duas camadas (emboço e reboco), cada uma delas cumpre funções específicas. O emboço possui uma camada de regularização da base e o reboco uma camada de acabamento. Já os revestimentos constituídos por uma única camada, a mesma cumpre as duas funções de regularização da base e acabamento. Além disso, esses dois tipos de revestimento podem ser aplicados sobre uma camada de preparo da base (chapisco) e podem receber sobre a sua superfície uma camada de acabamento decorativo. Assim, as argamassas de cada tipo de camada de revestimento possuem propriedades diferentes, de acordo com a função que se deseja (BAÍA; SABBATINI, 2008).

Nesse contexto, fica claro que as argamassas desempenham um importante papel em qualquer construção feita com pedras, tijolos ou blocos cerâmicos, pois tem a função de juntar as diversas unidades desses materiais entre si. Outra função básica é o revestimento, é propiciar uma maior proteção aos vários elementos construtivos. Em consequência, uma argamassa de qualidade tem grande parcela de colaboração na durabilidade das edificações (SANTIAGO, 2007).

Um exemplo prático da importância do revestimento de argamassa é sua capacidade de isolamento térmico e acústico. Por exemplo, um revestimento de 30 a 40% de espessura da parede, pode ser responsável por 50% do isolamento acústico, 30% do isolamento térmico, além de contribuir em 100% de estanqueidade de uma vedação de alvenaria comum (ABCP, 2003).

Os revestimentos de argamassa apresentam ainda outras importantes funções, que segundo Baía e Sabbatini (2008) são:

- Proteger os elementos de vedação dos edifícios contra a ação dos agentes agressivos;
- Regularizar a superfície dos elementos de vedação com o objetivo de receber adequadamente outros revestimentos;
- Contribuir para estética da fachada.

Objetivando satisfazer as funções anteriores, algumas propriedades das argamassas de revestimento tornam-se essenciais, dentre elas a trabalhabilidade (principalmente, consistência, plasticidade e adesão inicial), retração, aderência, permeabilidade à água, resistência mecânica e capacidade de absorver deformações (CARASEK, 2010).

Para que os revestimentos argamassados possam cumprir de maneira adequada suas funções, é necessário que eles apresentem um conjunto de propriedades específicas, relativas à argamassa tanto no estado plástico como no estado endurecido. Sendo assim, o entendimento dessas propriedades e dos fatores que influenciam a sua obtenção, permite avaliar o desempenho dos revestimentos nas diferentes situações de uso (BAÍA; SABBATINI, 2008).

## **2.3 Propriedades das argamassas no estado fresco**

### **2.3.1 Trabalhabilidade**

Trabalhabilidade é a propriedade que determina a facilidade com que as argamassas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea. Essa propriedade garante as condições de execução, o adequado desempenho do revestimento em serviço e resulta em diversas outras propriedades, tais como: consistência, plasticidade, retenção de água e de consistência, coesão, exsudação, densidade de massas e adesão inicial (CARASEK, 2010).

A argamassa apresenta duas tendências opostas: a segregação e coesão. A relação entre as duas características origina a trabalhabilidade, que não pode ser medida, mas pode ser simplesmente avaliada. Uma argamassa de boa trabalhabilidade possui atrito interno mínimo junto com a coesividade máxima. Nessas condições, a aplicação da argamassa se torna menos cansativa, porque é fácil de ser manuseada, e continua com boa resistência. A trabalhabilidade depende da quantidade de água, da proporção entre a pasta e areia, da granulometria da areia e suas características superficiais e do aglomerante usado (VERÇOZA, 1987).

Cincotto, Silva e Carasek (1995) citam que a trabalhabilidade é positivamente alterada quando o agregado possui alto módulo de finura, distribuição granulométrica

contínua e grãos não angulosos. Comenta ainda, que a adição de cal e cimentos com maior finura podem resultar em argamassas com maior trabalhabilidade.

Com essas características adequadas a argamassa se torna trabalhável e, conseqüentemente, maior será sua facilidade de penetração na base (CARASEK; CASCUDO; JUCÁ, 2005). Além disso, a presença da cal e de aditivos incorporadores de ar, melhoram até determinado limite essa propriedade (BAÍA; SABBATINI, 2008).

Na prática, uma argamassa de revestimento é considerada trabalhável quando: deixa penetrar facilmente a colher do pedreiro (sem ser fluída); mantém-se coesa ao ser lançada (mas, não adere a colher ao ser lançada); distribui-se facilmente e preenche todas reentrâncias da base; e não endurece rapidamente quando aplicada (BAÍA; SABBATINI, 2008).

Dessa forma, a boa trabalhabilidade de uma argamassa é fundamental para que o revestimento apresente adequado desempenho quanto à aderência ao substrato e acabamento superficial (SANTANA; CARNEIRO; SAMPAIO, 2001).

Com relação a trabalhabilidade de argamassas produzidas com AR, observa-se um efeito negativo com o aumento do teor de substituição dos AN pelos AR e, isto ocorre, provavelmente, devido à presença de resíduos de cimento hidratado na fração miúda (FERRO *et al.*, 2015) e também a textura superficial rugosa e porosa dos AR (PEDROZO; ROCHA; CHERIAF, 2008).

Ledesma *et al.* (2015) comentam que as argamassas precisam manter sua trabalhabilidade por um período de tempo razoável (trabalhabilidade funcional), embora as normas europeias não estabeleçam qualquer limite para esta propriedade. Estes autores, mostraram que a trabalhabilidade funcional diminui com o aumento da quantidade de AR e atribuem tal fato a elevada absorção de água destes agregados.

### **2.3.2 Consistência**

De acordo com Carasek (2010) a consistência é a propriedade com que a argamassa possui a maior ou menor facilidade de se deformar sob a ação de cargas. Geralmente, classificam-se as argamassas segundo sua consistência: secas, plásticas ou fluídas. Uma argamassa é dita seca quando a pasta aglomerante preenche somente os vazios entre os agregados, resultando no atrito entre as partículas; plástica quando uma fina camada de pasta aglomerante “molha” a

superfície dos agregados; e fluida quando as partículas do agregado estão imersas no interior da pasta aglomerante. Essas características são influenciadas pelos tipos e pelas quantidades de aglomerantes e agregados, pelo tempo e pela intensidade da mistura e a presença de aditivos (principalmente os incorporadores de ar).

O índice de consistência é uma das principais propriedades utilizadas para avaliação da trabalhabilidade das argamassas (CARNEIRO *et al.*, 2001). No Brasil, os procedimentos para a determinação do índice de consistência são apresentados na NBR 13276 (2005).

Miranda (2000) observou que as argamassas com AR perdem fluidez com o passar do tempo. O ensaio de consistência foi realizado em função do tempo, no qual o tempo de medição variou a cada trinta minutos até um total de uma hora e meia. Como resultado, algumas argamassas apresentaram uma consistência menor que 240 mm, no final de 1 h 30 min, cuja aplicação como revestimento ficaria muito difícil, sendo necessário reamassá-las com água, o que poderia prejudicar o desempenho do revestimento.

Oliveira e Cabral (2011) observaram que a incorporação do AR exigiu uma maior quantidade de água para se atingir a consistência desejada – o que também foi observado no estudo de Silva, Brito e Dhir (2016), e pode ser atribuído à presença das partículas finas ( $<75\mu\text{m}$ ), aumentando assim, a superfície específica a ser molhada, além da maior porosidade deste tipo de agregado.

### **2.3.3 Retenção de água**

A retenção de água pode ser definida como sendo uma propriedade que está associada à capacidade da argamassa fresca em reter a água de amassamento quando entra em contato com uma superfície absorvente. Ou ainda, é a capacidade que a argamassa possui em manter sua consistência ou trabalhabilidade quando submetida a solicitações que provocam perda de água de amassamento seja por evaporação, sucção ou absorção de água à base (TRISTÃO, 1995; CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995).

A retenção permite que as reações de endurecimento da argamassa aconteçam gradativamente, garantindo que as reações de hidratação do cimento ocorram de maneira adequada e, conseqüentemente, impliquem em ganho de

resistência. É indesejável a rápida perda de água, pois compromete a aderência, a capacidade de absorver deformações, as resistências mecânicas e, portanto, a durabilidade e estanqueidade dos revestimentos (BAÍÁ; SABBATINI, 2008).

Quando se executa um revestimento de argamassa em clima quente e seco ou em bases com elevada absorção é necessária uma argamassa com maior capacidade de retenção de água (CEOTTO; BANDUK; NAKAKURA, 2005). Sendo assim, essa propriedade torna-se mais importante quando aplicada sobre substratos com alta sucção de água ou em condições climáticas desfavoráveis como, altas temperaturas, baixa umidade relativa e ventos fortes (CARASEK, 2010).

A determinação da retenção de água pode ser avaliada pelo método da norma NBR 13277 (2005), intitulado por “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água”, na qual descreve um método de teste para avaliar a capacidade de retenção de água da argamassa fresca usando um papel filtro para produzir uma sucção sobre sua superfície e medir a água retida.

As argamassas com AR estudadas por Santana, Carneiro e Sampaio (2001) apresentaram valores para a retenção de água superior a 75%. Observaram também que a retenção de água das argamassas aumenta gradualmente à medida que se substitui areia por AR.

Jochem (2012) constatou que argamassas compostas por resíduos de construção e resíduos cerâmicos apresentaram excelentes retenções de água, chegando a resultados em torno de 98%. A autora enfatiza ainda, a importância desta propriedade, visto que colabora para uma melhor hidratação do cimento e, conseqüentemente, para a diminuição da retração e o surgimento de fissuras ao longo de tempo.

Silva, Brito e Dhir (2016) afirmam que em função da maior rugosidade dos AR e, conseqüentemente, maior superfície específica, é possível que a maior quantidade de água presente nos poros superficiais crie uma força coesiva em uma molécula de água vizinha. Essa força coesiva é induzida pela atração eletrostática entre o átomo de hidrogênio positivo e o átomo de oxigênio altamente eletronegativo (isto é, ligação de hidrogênio). Com isso, as argamassas frescas com AR, quando colocadas em uma superfície de absorção (tijolo, por exemplo), a perda de água livre será menor ou equivalente à de argamassas com AN.

### 2.3.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa no estado fresco das argamassas, também denominada de massa específica, representa a relação entre a massa e o volume do material. Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será a longo prazo, reduzindo assim, o esforço do operário durante a sua aplicação e conseqüentemente, resulta em um aumento da produtividade ao final da jornada de trabalho. A densidade de massa varia com o teor de ar (especialmente os incorporados por meio da utilização de aditivos) e com a massa específica dos constituintes da argamassa, prioritariamente do agregado (CARASEK, 2010).

Os vazios presentes nas argamassas são decorrentes do ar aprisionado/incorporado ou dos espaços deixados após evaporação do excesso de água (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995). O ar aprisionado ou incorporado possui forma esférica e se origina no processo de amassamento da argamassa e da adição de aditivos. Os vazios de ar aprisionado, representam de 2 a 3% da porosidade total das argamassas e os vazios de ar incorporado variam de 50 a 200 $\mu$ m, sendo ambos, desfavoráveis à resistência mecânica e à impermeabilidade das argamassas (CARNEIRO, 1999).

A densidade de massa e o teor de ar interferem nas propriedades das argamassas. Uma argamassa com menor densidade de massa e maior teor de ar será mais trabalhável. E à medida que o teor de ar cresce, a massa específica da argamassa no estado fresco diminui. Ressalta-se ainda que um aumento excessivo do teor de ar incorporado pode prejudicar a resistência mecânica e a aderência da argamassa (BAÍA; SABBATINI, 2008).

A NBR 13278 (2005) prescreve os procedimentos para a realização dos ensaios, bem como os cálculos necessários para a determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

Em geral, o aumento da quantidade de AR resulta em argamassas com menor densidade de massa no estado fresco, o que se deve a microestrutura mais porosa dos AR (SILVA; BRITO; DHIR, 2016). Zhao *et al.* (2015) e Ledesma *et al.* (2015) observaram que a densidade de massa das argamassas no estado fresco diminui devido à menor densidade da AR. Estes últimos autores ressaltam ainda, que a principal vantagem de uma argamassa mais leve é que, para um mesmo volume de

argamassa produzida, a quantidade de massa a ser transportada é menor. Em contrapartida, a argamassa leve absorve mais água do que o habitual (resultado de um maior volume de materiais porosos), o que pode ter um efeito negativo sobre a durabilidade das argamassas, especialmente quando expostas à ambientes externos.

Araújo (2014) e Muñoz-Ruiperez *et al.* (2016) observaram que as argamassas com AR de RCD apresentaram um aumento no teor de ar incorporado à medida em que os AN são substituídos.

Por outro lado, Ledesma *et al.* (2015), observaram que à medida em que os AR (constituídos de tijolos cerâmicos e argamassa aderida aos mesmos) foram incorporados, o teor de ar incorporado das argamassas diminuiu. Os autores relacionam esta diminuição ao fato da AR em estudo possuir elevada quantidade de materiais friáveis (cerca de duas vezes maior que a do AN), o que aumenta a quantidade de partículas finas quebradas durante o processo de mistura. Segundo Corinaldesi (2012) o aumento da quantidade de partículas finas (especialmente as <0,063 mm), proporciona uma diminuição no número de macro poros e, conseqüentemente, o teor de ar incorporado diminui.

### **2.3.5 Retração**

O mecanismo complexo de retração está associado a variação de volume da pasta-aglomerante e desempenha um papel fundamental no desempenho das argamassas aplicadas, sobretudo quanto à estanqueidade e à durabilidade. A tensão de tração, oriunda da retração, é função direta do seu módulo de elasticidade, onde argamassas com elevada quantidade de cimento são mais sujeitas às tensões que causarão o aparecimento de fissuras durante a secagem (CARASEK, 2010).

O surgimento de fissuras e microfissuras no revestimento, permitem a percolação da água, comprometendo a sua estanqueidade à água (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998).

Segundo Baía e Sabbatini (2008), os fatores que influenciam essa propriedade são: as características e o proporção dos materiais que constituem a argamassa; a espessura e o intervalo de aplicação das camadas; o tempo de sarrafeamento e desempenho.

Além desses fatores, a retração é influenciada pela quantidade de materiais pulverulentos (grãos com tamanhos inferiores a 0,075 mm) e pelo teor de água das argamassas. De maneira geral, quanto maior o teor de finos, maior a retração, principalmente quando os grãos são inferiores a 5  $\mu\text{m}$ , chamados de argila. Esses finos, em função de sua natureza e alta superfície específica, necessitam de maior quantidade de água de amassamento para um espalhamento adequado, gerando, portanto, maior retração e fissuração, o que compromete a durabilidade dos revestimentos. O aumento quantidade de água contribui ainda para a retração, devido ao aumento do volume de pasta, em consequência da diminuição do volume proporcional de agregados (CARASEK, 2010).

## **2.4 Propriedades das argamassas no estado endurecido**

### **2.4.1 Resistência mecânica**

Para as argamassas a resistência mecânica não é uma propriedade fundamental como é para o concreto (CORINALDESI, 2009). Todavia, sua determinação é justificada, pois a resistência mecânica das argamassas está relacionada com a elasticidade que interfere na durabilidade dos revestimentos. Assim, as argamassas precisam ter resistência suficiente para suportar movimentações do substrato, advindas de recalque ou variação dimensional, umedecimento e secagem ou dilatação e contração do próprio revestimento, devido às variações térmicas (TRISTÃO, 1995).

Essa propriedade é influenciada pela natureza e o consumo dos aglomerantes e agregados. Nas argamassas de cimento, por exemplo, a resistência a tração e a compressão diminui com o aumento da proporção de agregados. Quando o agregado é excessivamente fino, implicará em um maior consumo de água e, conseqüentemente, a argamassa será porosa e terá menor resistência. Outro fator é a presença de matéria orgânica (argilosa ou silicosa) presentes nos agregados, que impedem a completa consolidação e ligação entre o agregado e o a pasta (MARTINS; ASSUNÇÃO, 2010).

A resistência das argamassas depende, essencialmente, do aglomerante usado, da densidade aparente da areia, do índice de hidraulicidade do aglomerante, e da quantidade de água. A quantidade de água de amassamento, relaciona-se

diretamente com o índice de vazios e a área específica dos grãos, o que se pode então deduzir que a composição granulométrica e a forma dos grãos são as principais propriedades das areias que interferem nas resistências mecânicas das argamassas (VERÇOZA, 1987).

Baía e Sabbatini (2008) explicam que a resistência mecânica aumenta com a redução da proporção agregado na argamassa e varia inversamente com a relação a/c da argamassa. Para Martins e Assunção (2010) uma maior compactação dos materiais acarreta em uma mistura mais densa e, conseqüentemente, com maior resistência à tração, compressão e às ações de desgaste por abrasão e de impactos.

Em alguns casos, os esforços mecânicos tendem a se manter equivalente ou superior aos de argamassas com AN (SANTANA; SAMPAIO; CARNEIRO, 2001; CABRAL *et al.*, 2010; OLIVEIRA; CABRAL, 2011; ARAÚJO, 2014; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; SAMIEI *et al.*, 2015). Muitos efeitos podem estar sobrepostos, como por exemplo a melhor ligação entre o AR e a matriz cimentícia, a maior compacidade oferecida a mistura, além da reação química e pozolânica destes agregados com os aglomerantes (SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

Por outro lado, outros autores observaram que haverá queda na resistência à compressão das argamassas, conforme se aumenta a quantidade de AR (KRÜGER; SOUZA; KONOFAL, 2013; ZHAO *et al.*, 2015; LEDESMA *et al.*, 2015; FERRO *et al.*, 2015; MUÑOZ-RUIPEREZ *et al.*, 2016). Este último autor, atribui a redução da resistência à compressão das argamassas, ao aumento da presença de resíduos de cimento hidratado nos AR, responsáveis pela elevada absorção de água. Além disso, Silva, Brito e Dhir (2016) citam que a resistência mecânica é dependente do desempenho mecânico dos agregados e não da resistência da matriz cimentícia.

#### **2.4.2 Capacidade de absorver deformações**

Os revestimentos argamassados devem também ser capazes de absorver pequenas deformações, de modo que não ocorra ruptura ou microfissuras e, conseqüentemente, não venha comprometer a aderência, estanqueidade e durabilidade (CARASEK, 2010). O revestimento pode absorver deformações intrínsecas (do próprio revestimento) ou extrínsecas (da base) sem sofrer ruptura, sem apresentar fissuras prejudiciais e sem perder aderência. Esta capacidade de absorver

deformações é governada pela resistência à tração e pelo módulo de deformação do revestimento (ABCP, 2003).

As deformações podem ser de grande ou de pequena magnitude. O revestimento tem a responsabilidade de absorver somente as deformações de pequena magnitude, que ocorrem devido à ação da umidade ou da temperatura. A capacidade de absorver essas deformações dependerá do módulo de deformação da argamassa que, quanto menor for (menor teor de cimento), maior será a capacidade de absorver deformações (BAÍÁ; SABBATINI, 2008).

Dessa forma, a qualidade a durabilidade de argamassas de revestimento está diretamente relacionada com a sua capacidade de absorver deformações e, portanto, é necessário que as argamassas possuam elasticidade suficiente para se deformarem, porém, elevados módulos de elasticidade não são apreciáveis, pois impedem as deformações e, conseqüentemente, surgem tensões de tração no revestimento, podendo ocasionar o surgimento de fissuras (JOCHEM, 2012). Quando existe uma grande diferença entre os módulos de elasticidade da parede e a argamassa, pode ocorrer o desprendimento, reduzindo assim, a durabilidade dos revestimentos. Logo, o módulo de elasticidade de uma argamassa de revestimento deve ser suficiente para que não ocorra danos à própria argamassa e, no máximo, igual ao da alvenaria (SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

A elasticidade das argamassas é expressa pelo módulo de elasticidade, que pode ser avaliado através da NBR 15630 (2009) - "Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica".

Alguns autores (LEITE *et al.*, 2000; CABRAL *et al.*, 2010; JOCHEM, 2012; ARAÚJO, 2014) observaram que o módulo de elasticidade das argamassas com AR foi inferior ao das argamassas com AN. Tal resultado, ocorre devido à menor rigidez do AR, que por sua vez, é dependente de sua porosidade (CABRAL *et al.*, 2010), o que implica em argamassas com maior capacidade de absorver deformações do substrato, reduzindo assim, a susceptibilidade ao surgimento de fissuras e ao desprendimento do revestimento (SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

### 2.4.3 Aderência

Entende-se a aderência como a propriedade que possibilita à camada de revestimento resistir às tensões normais e tangenciais atuantes na interface base e revestimento (MARTINS; ASSUNÇÃO, 2010). A aderência deriva, segundo Carasek (2010), da conjunção de três propriedades da interface argamassa-substrato: a resistência de aderência à tração; a resistência de aderência ao cisalhamento; a extensão de aderência (razão entre a área de contato efetivo e a área total possível de ser unida).

A aderência do revestimento ao substrato, depende exclusivamente, das propriedades das argamassas no estado fresco, dos procedimentos adotados durante a execução do revestimento, da natureza e características da base, bem como da sua limpeza superficial (BAÍA; SABBATINI, 2008).

Para se ter boa aderência ao substrato, a argamassa deve possuir boa retenção de água, o que permite que a perda de água para o substrato ou para a superfície seja mínima e, por conseguinte, ocorra uma melhor hidratação do cimento e carbonatação da cal hidratada. Para tanto, a argamassa deve possuir adequada proporção aglomerante/agregado, relação água/materiais secos e boa capacidade de retenção de água que depende da relação a/c e dos aditivos utilizados na produção das argamassas (SANTOS; AUGUSTO; BECERE, 2015).

Com relação aos constituintes das argamassas, tanto a sua natureza como as proporções, exercem grande influência na aderência. O cimento, por exemplo, quanto mais fino for, maior é a resistência de aderência obtida, principalmente nas primeiras idades. A cal, por sua vez, devido à sua capacidade de reconstituição autógena, proporciona maior extensão de aderência e favorece a sua durabilidade. A areia é outro fator que influencia a aderência, sendo indesejáveis areias muito grossas e com elevados teores de finos (CARASEK, 2010).

O teste de aderência à tração é medido através da NBR 13528 (2010) e da NBR 15258 (2005), essa última norma apresenta uma metodologia para avaliação em laboratório. Carasek (2010) cita que tão importante quanto os valores de resistência de aderência é a análise do tipo de ruptura. Quando a ruptura é coesiva, ocorrendo no interior da argamassa ou da base (tipos B e C, da Figura 2.6), os valores são menos preocupantes, ao menos que sejam muito baixos. Em contrapartida, quando a ruptura

é do tipo adesiva (tipo A), isto é, ocorre na interface argamassa/substrato, os valores devem ser mais elevados, pois existe um maior potencial para o surgimento de manifestações patológicas.

A ruptura do tipo D indica que a porção mais fraca é a camada superficial do revestimento e quando os valores obtidos são baixos, sugere uma resistência superficial inadequada (polverulência). A ruptura do tipo E é indica um defeito na colagem da pastilha, devendo ser, portanto, desprezado.

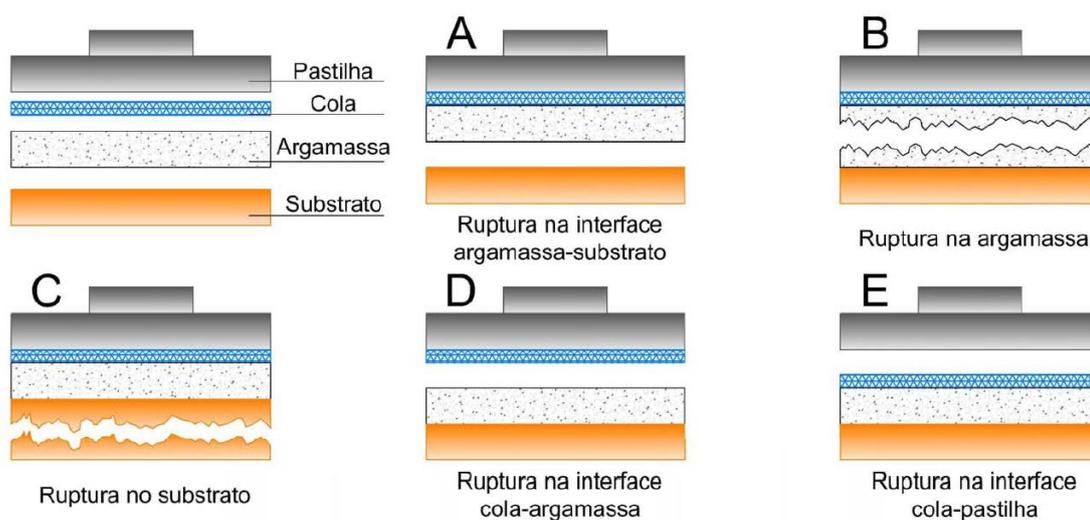


Figura 2.6 – Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração

Fonte: Carasek (2010).

As argamassas com AR normalmente apresentam boa aderência, especialmente quando se usa um AR muito fino. Atribui-se também, o fato das argamassas com AR apresentarem maior capacidade de retenção de água, permitindo assim, uma melhor hidratação do cimento e diminuição da absorção de água da mistura por parte do substrato. Logo, a aderência entre o substrato e a argamassa é melhorada (SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

No trabalho de Oliveira e Cabral (2011) foi constatado um aumento da resistência de aderência. O mesmo foi observado por Santana, Sampaio e Carneiro (2001), cujo valor foi superior a 0,30 MPa e ao limite estabelecido por norma para argamassas de revestimento. Comentam ainda, que a adição de 50% de AR melhora a resistência de aderência à tração, em comparação às das demais argamassas com AR e com cal, além de apresentar valor similar ao obtido pela argamassa de referência.

Ledesma *et al.* (2015) relatam com base em seu estudo que embora os valores médios de resistência de aderência diminuam linearmente com o aumento da quantidade de AR incorporado, não houve diferenças estatisticamente significantes para relações de substituição inferiores a 75%, apesar da dispersão dos resultados no teste de arranchamento.

#### **2.4.4 Permeabilidade**

A permeabilidade está relacionada com a passagem da água pela camada de argamassa por meio de seus poros. Esta propriedade depende da natureza da base; da composição e dosagem da argamassa; da técnica de execução; da espessura da camada de revestimento e do acabamento final (BAÍÁ; SABBATINI, 2008). Características essas, fundamentais, pois uma argamassa impermeável impede a penetração da água, um dos mais danosos agentes de degradação, nos edifícios (SANTIAGO, 2007).

De acordo com Verçozza (1987) a permeabilidade varia com a idade da argamassa: argamassas mais novas deixam de passar a umidade mais facilmente que misturas mais antigas. Isso deve-se ao crescimento dos cristais e à depósito de poeira que petrifica. Essa propriedade pode ser acentuada com uma dosagem e constituição convenientes.

Carneiro (1999) cita que permeabilidade de uma argamassa é influenciada pelos poros capilares<sup>1</sup> de dimensões superiores a 50nm e pelas bolhas de ar incorporado que podem chegar até 3nm. Como os capilares são vazios ainda não preenchidos pelos compostos endurecidos do aglomerante, a permeabilidade depende do seu endurecimento ao longo do tempo, isto é, quanto mais idade tiver a argamassa, mais endurecida e, conseqüentemente, menor será sua permeabilidade. A permeabilidade pode ainda ser influenciada pelo tempo de amassamento, pois se prolongado, incorpora ar e pela continuidade da curva granulométrica do agregado, que favorece o empacotamento da argamassa.

---

<sup>1</sup> O excesso de água em relação à água combinada na hidratação, origina os poros capilares que são os espaços não preenchidos pelos compostos sólidos da pasta de cimento endurecido e que possuem formato irregular. Os poros capilares de dimensão maior que 50nm, denominados de macro poros, são desfavoráveis à resistência e à permeabilidade e, os poros menores, denominados de micro poros, influenciam na retração por secagem e fluência (CARNEIRO, 1999).

Jochem (2012) cita que a permeabilidade é diferente da porosidade. Se a porosidade for elevada e os poros estiverem conectados, haverá uma maior facilidade de deslocamento dos fluídos através da argamassa e, em consequência, haverá aumento da permeabilidade. Todavia, se os poros não estiverem conectados entre si, não haverá movimentação dos fluidos e, por consequência, a permeabilidade será baixa.

Tristão (1995) explica que a absorção de água capilar de um revestimento deve ser inferior à da base a ser revestida e quanto menor está permeabilidade, melhor a proteção da base contra as intempéries, desde que possua permeabilidade ao vapor d'água.

Santana, Sampaio e Carneiro (2001) e Muñoz-Ruiperez *et al.* (2016) relataram que o uso de AR em argamassas provocou um aumento na absorção de água por imersão, o que pode ter sido provocado pela grande absorção de água apresentada por estes resíduos. Houve, também, um progressivo aumento da porosidade e do índice de vazios, confirmando a maior incorporação de ar quando se utiliza o AR. Jochem (2012) observou que o aumento da porosidade das argamassas produzidas com AR é proporcional à absorção, ou seja, quanto maior a porosidade, maior a quantidade de poros conectados e macro poros nas argamassas.

Ledesma *et al.* (2015) citam que em função da elevada absorção de água dos AR, a absorção de água por capilaridade das argamassas aumentou linearmente com o aumento da quantidade dos AR (cerca de 91% superior à das argamassas de referência, isso para uma relação de substituição de 100%). A absorção de água por capilaridade não é uma propriedade limitante no uso interno, mas a incorporação de AR em um ambiente externo pode promover o surgimento de patologias decorrentes da acumulação de água em argamassas.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), além da capacidade de criar, a água possui a capacidade de degradar os materiais naturais e artificiais, como o concreto e a argamassa. A água é um agente de transporte para os íons agressivos, então torna-se um fator essencial por trás da maioria dos problemas de durabilidade das matrizes cimentícias. Assim, valores baixos de absorção de água sugerem argamassas mais duráveis.

### 2.4.5 Durabilidade

A durabilidade é uma propriedade ligada ao período de uso do revestimento que resulta de suas propriedades no estado endurecido e que reflete o desempenho do revestimento diante das ações do meio externo ao longo do tempo. Alguns fatores prejudicam a durabilidade do revestimento, tais como: a fissuração; a espessura excessiva; a cultura e a proliferação de microrganismos; a qualidade das argamassas; a falta de manutenção (BAÍA; SABBATINI, 2008).

Se o material não tiver características adequadas, ou em certos casos, não for protegido da ação das intempéries por detalhes de projeto específicos (beirais, passeios, impermeabilização), terminará por se degradar e, em consequência disto, haverá desunião entre os elementos por ele ligados e destruição do próprio substrato sobre o qual está aplicado (SANTIAGO, 2007).

Para Scannell, Lawrence e Walker (2014), maiores resistências implicam em argamassas mais duráveis, contudo é vital garantir outras características, tais como porosidade, capacidade de retenção de água e plasticidade.

Segundo Carneiro (1999), a durabilidade de um revestimento de argamassa depende do desempenho da argamassa no estado endurecido, que por sua vez, é resultante da dosagem racional das frações ativa e inerte, das propriedades no estado fresco e da interação com a base sobre a qual é aplicada. A argamassa deve ter a capacidade de deformação a fim de evitar o surgimento de fissuras; possuir baixa porosidade, caso contrário terá maior permeabilidade e menor condutividade térmica; possuir aderência ao substrato; resistência ao fogo e ao ataque de agentes químicos, que dependem dos materiais constituintes das argamassas.

Segundo o manual de revestimentos de argamassa da ABCP (2003), a durabilidade dos revestimentos de argamassa está ligada à sua capacidade de manter o desempenho e suas funções ao longo do tempo. Dentre os fatores que contribuem para a diminuição da durabilidade de revestimentos estão a seguir relacionados:

- **Movimentações no revestimento:** as movimentações de origem térmica, higroscópica ou imposta por forças externas podem ocasionar a fissuração, desagregação e descolamento dos revestimentos;

- **Espessura dos revestimentos:** sendo excessiva intensifica a movimentação higroscópica nas primeiras idades, podendo ocasionar fissuras de retração, que podem comprometer a capacidade de aderência e a impermeabilidade do revestimento. A técnica de execução inadequada também pode ocasionar e/ou agravar o surgimento de tais fissuras.
- **Cultura e proliferação de microrganismos:** provocam manchas escuras que ocorrem geralmente em áreas permanentemente úmidas dos revestimentos. Os fungos e líquens que se proliferam na superfície do revestimento produzem ácidos orgânicos que reagem e destroem progressivamente os aglomerantes da argamassa endurecida.

Em relação as principais manifestações patológicas encontradas em argamassas de revestimento, as quais influenciam diretamente a durabilidade, a NBR 13749 (2013) descreve que podem ser:

- **Fissuras mapeadas:** podem ser formadas por retração da argamassa, por excesso de finos no traço, seja por causa do aglomerante, ou pelos finos que estão presentes nos agregados, ou até por causa do desempenho. No geral, apresentam-se em forma de mapa;
- **Fissuras geométricas:** ocorrem quando acompanham o contorno do componente da base, podendo ser geradas por retração da argamassa de assentamento. Em argamassas de revestimento, essas fissuras são decorrentes de retração higrométrica, interfaces de base constituída de materiais diferentes, e revestimento que contém junta de dilatação;
- **Vesículas:** são provocadas com a hidratação retardada do óxido de cálcio da cal e pela presença de concreções ferruginosas na areia;
- **Empolas pequenas:** ocorrem por causa da oxidação da pirita presente como impureza no agregado e resultam em formação de gipsita, além de expansão;
- **Expansão e deslocamento do revestimento:** são causados quando as fissuras são preenchidas com gesso, devido ao rápido endurecimento. Então, a gipsita formada durante a hidratação do gesso reagirá com o cimento presente na argamassa, formando etringita, e ocasionará a expansão.

- **Pulverulência:** a pulverulência pode ser provocada por causa do excesso de finos no agregado, devido à adoção de um traço pobre em aglomerante ou devido à carbonatação insuficiente da cal, quando a argamassa é feita de cal e areia, pois o clima seco, a temperatura e a ação do vento dificultam o processo de carbonatação.

Portanto, diante do exposto, percebe-se que a durabilidade dos revestimentos de argamassa está ligada a fatores como: a forma com que os revestimentos são executados (concepção e conhecimento técnico dos operários), os materiais utilizados e, conseqüentemente, as propriedades obtidas no estado fresco e endurecido.

## 2.5 Argamassas com agregado reciclado

Buscou-se neste item, realizar uma abordagem sucinta das principais pesquisas relacionadas ao uso de AR em argamassa, cumprindo a sua ordem cronológica. A princípio, serão apresentados estudos nacionais e em seguida internacionais.

Miranda (2000) em sua pesquisa utilizou produziu argamassas com três tipos de AR (blocos cerâmicos, argamassas e blocos de concreto) obtido por moagem em moinho e concluiu que:

- Nenhum desses AR possuem atividade pozolânica;
- O maior problema com relação a substituição do AN pelo reciclado é o elevado teor de finos presentes nesse material, sendo necessário limitar a quantidade para evitar o excesso de refinamento de poros, principalmente quando AR com elevado teor de argamassas são utilizados.
- É necessário fazer um controle na granulométrica do RCD, limitando as dimensões das partículas entre 2,4 mm até 0,15 mm, descartando os finos e utilizando um outro material como plastificante, como por exemplo a cal;
- É possível reduzir em 50% do custo do m<sup>3</sup> de argamassa mista, de traço 1:1:8 em massa quando se substitui 100% da AN pela AR.
- Argamassas produzidas com AR de RCD apresentaram boa aceitação por pedreiros quanto à plasticidade, adesão inicial ao substrato e ao desempenho;

- É possível obter revestimento de argamassas com RCD reciclado com bons desempenhos quanto a aderência ao substrato e ao surgimento de fissuras quando são utilizadas técnicas racionais de dosagem.

Santana, Carneiro e Sampaio (2001) realizaram diversos testes em argamassas com AR, com substituição do AN pelo reciclado em 30%, 50%, 75% e 100%. Com os resultados, observaram que, de modo geral, as argamassas com 50% de AR apresentaram o melhor desempenho na maioria das propriedades avaliadas, destacando-se como o teor mais indicado para a produção de argamassas nessa pesquisa. Comentam ainda que, qualquer pesquisa que avalie o comportamento quanto à fissuração e à variabilidade de desempenho de revestimentos de argamassa com AR concluirá que o seu uso para esta finalidade não é simples e que, na maioria dos casos, resulta em revestimentos totalmente fissurados e com resistência superficial imprevisível, no caso de ausência de testes preliminares.

Miranda e Selmo (2003) avaliaram o desempenho de argamassas de revestimento com AR de diferentes composições: blocos cerâmicos, blocos de concreto e argamassa. São comparados os parâmetros de dosagem das argamassas na proporção de mistura de 1:2:9 em volume (agregado com 5% de umidade), e suas propriedades no estado endurecido com o grau de fissuração dos revestimentos. Visando melhor comparar a influência do teor total de finos e das diferentes composições de entulho, foi estabelecido três teores totais de finos iguais a 18%, 25% e 32% da massa dos materiais secos, definidos através de um estudo preliminar de trabalhabilidade. Por fim, apontam algumas precauções para evitar a fissuração excessiva de revestimentos de argamassa com RCD:

- Não ultrapassar o teor de 25% de finos totais, que se mostrou como um valor crítico para iniciar as fissuras por secagem do revestimento de argamassa mista e suficiente para se obter boa trabalhabilidade;
- O teor de argamassa presente no entulho pode ser prejudicial quanto à fissuração;
- Ao diminuir o módulo de elasticidade, o revestimento fica mais deformável, sendo capaz de aliviar parte ou toda a tensão do revestimento, mas não garante que argamassas com AR não apresentem fissuras;

- Quando a tensão não for totalmente aliviada, caberá à resistência à tração impedir o surgimento de fissuras.

Miranda (2005) buscou em seu estudo desenvolver uma metodologia de produção de argamassas para revestimento de paredes e tetos com AR em usinas de reciclagem, com garantia de homogeneidade e bom desempenho. Para tanto, foi desenvolvido um programa experimental composto por cinco etapas com o objetivo de avaliar a variabilidade da AR e das argamassas produzidas na usina de Socorro/SP. Testou ainda, as seguintes variáveis: controle granulométrico, controle da natureza e do teor de finos ( $< 75 \mu\text{m}$ ) por lavagem, classificação visual do resíduo e formação de pilhas de homogeneização. Para a produção das argamassas o autor utilizou dois diferentes traços, sendo em 1:8 (cimento, AR não lavada) ou 1:1:8 (cimento, cal, AR lavada). Como conclusões, o autor constatou que o controle granulométrico da AR e a classificação visual de RCC não foram suficientes para reduzir a variabilidade das argamassas. Todavia, quando o controle de finos foi aplicado através da remoção das partículas  $< 0,15 \text{ mm}$  por lavagem e sua substituição por cal, segundo proposta de Miranda (2000), observou-se uma diminuição significativa da variação das propriedades das argamassas, e essa foi ainda mais reduzida com a utilização da técnica de formação de pilhas de homogeneização, em equipamento piloto projetado por este autor.

Em estudo realizado por Assunção, Carvalho e Barata (2007) foi observado que as argamassas de cimento Portland produzidas com até 50% de AR apresentaram melhor desempenho quanto à resistência mecânica e a trabalhabilidade, quando comparadas com a argamassa de referência (AN). Os autores citam ainda que apesar dos resultados satisfatórios, é necessário a continuidade de estudos para que os resíduos da construção civil possam ser utilizados de forma segura.

Pedrozo (2008) avaliou a influência da substituição do agregado miúdo natural por AR fino nas propriedades de concretos e argamassas. Para a produção das argamassas, foram utilizados os teores de substituição do agregado miúdo natural (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) pelo agregado miúdo reciclado, assim como uma relação a/c constante de 0,66. A substituição do AN pelo reciclado reduziu a trabalhabilidade e a resistência mecânica, porém tais resultados não inviabilizaram a utilização desses materiais em argamassas.

Gomes *et al.* (2010) estudaram a utilização de AR, provenientes da fase de fechamento de um edifício residencial na cidade de Maceió, em argamassas de revestimento. Observaram que com um teor de substituição de no máximo 43% do AN pelo reciclado, não houve prejuízo nas propriedades analisadas e que em alguns casos os resultados foram superiores. Comentam também que além do passivo ambiental provocado pela retirada dos resíduos da natureza, o uso de resíduos em obra comprova que as argamassas de revestimento produzidas com AR podem representar uma economia de 40% em relação às argamassas com AN. Todavia essa economia tem que estar entrelaçada a viabilidade tecnológica, que garanta pouco ou nenhum prejuízo às propriedades das argamassas.

Tanaka *et al.* (2010) verificaram a influência de areia de RCD da cidade de Curitiba, estado do Paraná, em diversas propriedades de argamassas de cimento Portland e areia na proporção em volume de 1:3. Utilizou-se as seguintes variações de areia: proveniente de britagem de materiais cerâmicos (paredes de alvenaria e revestimentos de pisos e paredes); de materiais cimentícios (lajes, vigas e pilares); de materiais cerâmicos e cimentícios, proporção 50% de AN e 50% de material cerâmico; e somente com AN. Os resultados dos ensaios demonstraram que o aumento da concentração de materiais cimentícios diminui a permeabilidade e melhora as propriedades mecânicas das argamassas.

Oliveira e Cabral (2011) verificaram o desempenho de argamassas de revestimento substituindo-se em 10%, 20%, 30%, 40% e 50% o AN pelo AR de RCD. Os resultados apontaram as argamassas com AR requerem mais água para manter a mesma trabalhabilidade, entretanto, melhora a resistência à compressão e a resistência de aderência ao substrato. Por fim, identificaram que o teor ótimo de substituição dos AN pelos AR encontra-se entre 30% e 40%.

Jochem (2012) comenta que um dos desafios da utilização dos AR em argamassas de revestimento é a sua grande absorção. Com isso, a autora buscou analisar o efeito da adição de finos, que está diretamente ligado ao consumo de água e a influência da molhagem prévia dos agregados com o intuito de compensar a grande quantidade de água absorvida. Para tanto, foi analisado o comportamento de uma AR média e fina, com grãos secos e em condição saturada superfície seca. Os resultados apontaram, de modo geral, que a molhagem prévia e a adição de finos afetam as propriedades das argamassas. Porém, a molhagem prévia dos AR com

distribuição granulométrica média, melhora praticamente todas as propriedades avaliadas das argamassas. Já as argamassas com a curva fina, a molhagem prévia melhora algumas propriedades e piora outras. Em relação à adição de finos, percebeu-se que até certo limite (em geral 18%), as propriedades das argamassas foram melhoradas e que a partir desse limite os resultados começam a reduzir gradativamente.

Alves, Evangelista e Toledo Filho (2012) investigaram a viabilidade da utilização de agregados miúdos reciclados (provenientes de resíduos de argamassa) em argamassas de cimento Portland para usos tradicionais como revestimento, assentamento e argamassa típica de concreto com resistência normal. O percentual de substituição da AN pela AR utilizado para o desenvolvimento do trabalho foi 0%, 50% e 100%. Foi observado que teor de substituição interfere diretamente na resistência à compressão axial das argamassas avaliadas. Concluíram, que a utilização de agregados miúdos reciclados de argamassa é adequada à aplicação em argamassas convencionais de cimento Portland para as misturas típicas de assentamento e revestimento. Contudo, é necessário a comprovação da viabilidade desse tipo de AR por meio de outros ensaios.

Oliveira (2012) analisou a influência do agregado proveniente de RCD na produção de argamassa de revestimento, substituindo o AN pelo AR nos teores de 0%, 25%, 50% e 75%, em massa. As misturas foram produzidas com o traço 1:6 (cimento: agregado) e o índice de consistência fixado em  $295 \pm 10$ mm. Os resultados demonstraram que o consumo de água e a retenção de água aumentaram com a incorporação do AR na mistura. No estado endurecido, as argamassas com agregado de RCD apresentaram melhor desempenho mecânico quando comparadas a argamassa com AN, sendo esse comportamento mais expressivo para a mistura com 75% de substituição.

Hawlitschek *et al.* (2013) compararam o desempenho de argamassas produzidas com uma AR britada abaixo de 1,2 mm (o que proporciona uma maior remoção da pasta de cimento), com outras duas areias comercializadas na cidade de São Paulo. Observou que o desempenho reológico da argamassa reciclada é bem similar ao de uma argamassa de referência e, adicionalmente, as propriedades mecânicas no estado endurecido não são tão reduzidas, apesar do AR elevar o consumo de água. Concluíram que, de maneira geral, a britagem dos RCD em frações

mais finas, apresentou-se com grande potencial para serem utilizados em argamassas, sendo, portanto, uma boa alternativa em locais onde a disponibilidade de jazidas de AN é escassa ou suas distâncias de transporte são maiores.

Malta *et al.* (2014) investigaram dois procedimentos com o intuito de combater a influência da absorção de água dos AR e sua influência nas propriedades reológicas das argamassas contendo 25% e 50% de AR em substituição (em massa) aos AN. Foi então realizado o procedimento de compensação de parte da água absorvida pelos agregados miúdos reciclados, fazendo-se sua pré-saturação, e uso dos agregados secos em estufa. Os resultados comprovaram que a pré-saturação gera maior impacto na redução da resistência à compressão das argamassas, independente do teor de substituição, em todas as idades e para todas as relações a/c. Foi observado também que a presença do agregado miúdo reciclado promove misturas com maior viscosidade, em função do AR apresentar contornos irregulares e textura mais áspera, o que aumenta a tensão de cisalhamento.

Rudnitski, Nakanishi e Mohamad (2014) verificaram a viabilidade técnica da substituição (total e parcial) da AN por AR provenientes de RCD, para confecção de argamassas de revestimento. Foram preparadas argamassas mistas na proporção de 1:2:8 (cimento, cal, agregado miúdo), nos teores de substituição de 10%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelo AR de RCD (frações cinza e vermelho). Os resultados mostraram que resistência mecânica das argamassas com AR mostraram-se maiores quando comparados com a argamassa de referência. Contudo, ao aplicar a AR nas argamassas para revestimento em paredes, todos os percentuais de substituição apresentaram elevadas fissuras nos revestimentos, concluindo que estas não apresentam bom desempenho quando aplicadas para esta finalidade, devido a quantidade elevada de finos e, conseqüentemente, ao elevado aumento na quantidade de água para manter a consistência.

Araújo (2014) analisou argamassas produzidas a partir de diferentes teores de substituição dos AN pelos AR (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%). Os resultados obtidos foram satisfatórios, visto que em alguns casos o desempenho das argamassas com AR foi melhor. A resistência à tração na flexão e à compressão para o traço 1:2:8 (cimento, cal e agregado) foram inferiores para as argamassas produzidas com AR e o melhor resultado foi para 20% de substituição. Para uma proporção em volume de 1:8 houve um aumento da resistência à tração e a compressão, onde o teor ideal de

substituição foi o de 100%. Concluindo, portanto, que do ponto de vista técnico, as argamassas produzidas com os resíduos de RCD podem ser utilizadas na construção civil, desde que se tenha um controle adequado tanto no processo de produção dos AR como na produção das argamassas.

Morales (2015) estudou o comportamento de argamassas cujo finos do AN, foram substituídos por 20% de finos de AR de RCD, em duas condições: seco e saturado. Dessa forma, foi utilizado um traço de 1:1:5 (cimento, finos e areia, respectivamente) e relação a/c de 1,25. A autora concluiu que o agregado previamente saturado, melhorou as propriedades mecânicas e a capilaridade das argamassas. Porém, a substituição contribuiu para o aumento da retração por secagem das argamassas. Os finos de RCD, apesar de terem contribuído para a trabalhabilidade, não a favoreceu a retenção de água das argamassas.

Em relação as pesquisas internacionais, observa-se o aumento do número de estudos realizados nas últimas décadas. A seguir serão apresentadas brevemente as principais pesquisas realizadas.

Corinaldesi, Giuggiolini e Moriconi (2002) investigaram a utilização de AR e a adição fibras de aço inoxidável e de polipropileno em argamassas, com o intuito, respectivamente, de reduzir a retração e melhorar a resistência à flexão. O AR foi obtido de uma usina de reciclagem localizada na Itália, onde sua principal composição era de demolição de edifícios. As proporções das misturas de argamassa foi de 1:3 (em peso) e o teor de água de cada argamassa foi definido para atingir a mesma consistência. O AR reciclado foi utilizado como substituto total do AN e como substituto parcial (30%) do cimento. Dessa forma, foram produzidas argamassas com 100% de AR (sendo, uma sem fibras e sem pó de tijolos, e outras duas com as duas fibras estudadas e sem a adição do pó) e 100% de AN (sendo, uma com pó de tijolos e sem fibras, e outras duas com o pó de tijolos e a adições das fibras de aço e polipropileno). A adição da AR (em comparação a adição do pó de tijolo) e a adição de fibras de polipropileno (em comparação as fibras de aço) resultaram em uma maior quantidade de água necessária para a realização da mistura. As argamassas com AR apresentaram excelente resistência de ligação com o substrato, exceto com a adição de fibra de polipropileno que reduzem a resistência à compressão e a resistência de ligação. No caso das argamassas com a adição do pó de tijolos, a incorporação de fibras de polipropileno reduz as propriedades mecânicas investigadas, o contrário

acontece com a introdução das fibras de aço inoxidável. O uso combinado das fibras, seja nas argamassas com AR ou pó de tijolos, resultou em argamassas com bom desempenho.

Corinaldesi e Moriconi (2009) avaliaram o comportamento mecânico e reológico de argamassas cimentícias produzidas com três tipos de AR: concreto, tijolos e RCD de uma usina de reciclagem. Para os três tipos de AR, com substituição de 100%, foi observado que a resistência mecânica das argamassas é significativamente menor que as de referências. As argamassas com AR de RCD e tijolo apresentaram uma maior força de ligação na interface pasta-agregado.

Corinaldesi (2012) pesquisou a possibilidade de utilizar argamassas com a incorporação de AR para reparação de edifícios históricos. Para tanto, foram produzidas argamassas de cimento e cal hidráulica com proporção em massa de 1:3 (aglomerante e agregado) e 100% de substituição do AN pelo AR. A quantidade de água necessária para a mistura dos materiais foi determinada de acordo com a consistência de  $120 \pm 10$  mm. Os AR foram produzidos a partir de tijolos cerâmicos e possuíam mesma dimensão máxima, porém com diferentes composições granulométricas. Com base nos resultados, os autores observaram que os tipos de ligantes e agregados parecem influenciar a microestrutura das argamassas, especialmente quando se utiliza cal hidráulica e AR mais fino. O uso do AR finamente moído conduz a uma argamassa com maior quantidade de poros, porém com uma melhor resistência de ligação entre a argamassa e o tijolo.

Lima e Leite (2012) propuseram a avaliar a resistência mecânica, as propriedades físicas e a retração por secagem de argamassas com agregados finos reciclados de RCD, contendo argamassa (55%), cerâmica (26%) e concreto (16%). Os autores produziram dois traços com relação cimento/areia de 1:4 e 1:8, em peso, e com teor de substituição do AN pelo reciclado de 50%. Os resultados mostraram que as argamassas recicladas apresentam maior porosidade total, maior taxa de absorção e maior retração por secagem. A adição de 50% de AR aumenta significativamente a porosidade e a absorção das argamassas, quando comparada com argamassa de referência. Para a mistura mais rica (1: 4), há uma diminuição da resistência à compressão que é cerca de 8%, enquanto que a mistura de argamassa com traço de 1:8, houve um ganho de resistência à compressão. A avaliação de perda de massa indicou que a maior presença de água nos poros dos AR ocorre devido a maior

porosidade deste material, proporcionando, conseqüentemente, maior quantidade de água presente na mistura.

Jiménez *et al.* (2013) avaliaram o desempenho no estado fresco e endurecido de argamassas de revestimento, substituindo diferentes percentuais (0%, 5%, 10%, 20% e 40%) do AN por AR (resultante da demolição de uma alvenaria, isto é, sua constituição é basicamente de tijolo cerâmico e argamassa). A proporção volumétrica estudada foi de 1:7 (cimento e agregado) para todas as argamassas e a quantidade de água foi determinada para uma consistência de  $175 \pm 10$  mm. Os resultados mostraram que é viável produzir argamassas com até 40% de substituição do AN por AR sem afetar significativamente as suas propriedades no estado fresco e endurecido, com exceção a densidade e a trabalhabilidade.

Martínez *et al.* (2013) compararam as propriedades das argamassas produzidas com três tipos de AN (dois tipos obtidos da britagem de rochas e um tipo de leito de rio) e três tipos de AR (concreto, cerâmica e resíduos de alvenaria). Para a produção das argamassas foi utilizado uma proporção, em volume de 1:5:1 (cimento, AR e cal hidratada) – o equivalente ao traço de 1:4:2 com AN; e 100% de substituição do AN pelo AR. Os autores verificaram que as argamassas com os três tipos de AR apresentaram resultados satisfatórios, o que foi atribuído a melhor distribuição granulométrica dos AR e a baixa qualidade dos AN localizados em Cuba. Além disso, a utilização de materiais de enchimento, tais como cal hidratada, filler calcário ou escória é necessário para que as argamassas com AR apresentem maior compactação. Todavia, em função da maior capacidade de absorção dos AR, as argamassas apresentaram maior capacidade de absorção, porosidade e retração do que as argamassas com AN.

Cuenca-Moyano *et al.* (2014) estudaram a influência dos AR provenientes de uma usina de reciclagem de RCD, na condição pré-saturados, nas propriedades de argamassas de revestimento. O teor de substituição do AN pelo reciclado foi 25%, 50%, 75% e 100%. Foi observado que a pré-saturação causou uma ligeira redução da consistência das argamassas, em consequência da menor quantidade de água livre na mistura. A Resistência à compressão e à flexão das argamassas com o AR pré-saturado foram melhores, independentemente do percentual de AN substituído. Não houve variação do coeficiente de absorção de água devido a à ação capilar. Nesse

sentido, que o método de pré-saturação dos AR melhorou o desempenho de argamassas, aumentando a probabilidade de reciclagem dos RCD.

No trabalho de Lima, Toledo Filho e Gomes (2014) foi estudado a influência do agregado miúdo reciclado obtido a partir de RCD nas propriedades reológicas de argamassas de cimento Portland. O RCD foi inicialmente separado por seus principais componentes (cimento, restos de cerâmica e concreto) em laboratório e, posteriormente, moídos separadamente com a granulometria correspondente a areia de construção civil, a fim de gerar AR mais homogêneos. Foram produzidas uma argamassa convencional e três argamassas contendo AR com uma relação areia/cimento de 4 e índice de consistência de  $255 \pm 5$  mm. Foi observado que, em função das características dos AR, tais como elevado teor de finos, maior absorção e formato irregular, foi necessário alterar a relação a/c das argamassas para manter a mesma consistência. Quanto ao comportamento reológico, as argamassas (naturais e recicladas) apresentaram comportamento anti-tixotrópico após 30 minutos, contados a partir do início da hidratação do cimento. Verificou-se ainda, que as argamassas com AR apresentaram menor viscosidade e tensão de cisalhamento, sendo este comportamento atribuído a maior relação a/c das misturas.

Samiei *et al.* (2015) estudaram a influência da incorporação de AR, produzidos a partir de resíduos de concreto de alta qualidade, em argamassas simples (cimento) e mistas (cimento e cal hidráulica), com proporção em massa de 1:3 e 1:1:6, respectivamente. A substituição gradativa do AN pelo AR foi 25%, 50% e 100%. Como esperado, as argamassas de cimento apresentaram desempenho mecânico superior ao das argamassas de cimento e de cal hidráulica. Todavia, a diminuição da resistência foi observada nas argamassas de cimento, quando o AN foi substituído pelo AR. O contrário ocorreu com as argamassas mistas, visto que o aumento da incorporação do AR resultou em melhoria das propriedades mecânicas das argamassas em até 60%. Os autores sugerem que está melhoria deve-se a um efeito sinérgico da hidraulicidade da cal e o efeito de enchimento que a fração fina dos AR proporcionam à mistura, o que resulta em argamassas de cal mais densas e, conseqüentemente, os poros capilares são bloqueados.

Zhao *et al.* (2015) estudaram a influência do agregado miúdo reciclado de concretos na condição seco e saturado, nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido. Os autores constataram que a resistência a compressão diminui

com o aumento do teor de substituição dos agregados e que a fração mais fina da AR (<0,63 mm) tem pior efeito sobre as propriedades mecânicas das argamassas. As argamassas com AR seco apresentaram espalhamento mais elevado do que as argamassas produzidas com AR saturado. No entanto, a argamassa com agregado seco perde mais rapidamente a consistência. Isto deve-se, possivelmente ao seu maior espalhamento inicial e a redução de água livre pela absorção da AR. Para qualquer relação a/c utilizada, o espalhamento das argamassas produzidas com AR saturados foi sempre maior. Em geral, a resistência à compressão diminui com o aumento do teor de AR, todavia as argamassas com o agregado seco, obtiveram melhores resultados.

Ferro *et al.* (2015) analisaram as propriedades de argamassas de cimento, com proporção em massa de 1:3 (com relação a/c fixa em 0,5). Os teores de substituição do AN pelo reciclado foram de 25%, 50% e 75%. Foi observado que o AR induziu a uma maior demanda de água e, isto contribuiu, para diminuição da trabalhabilidade, além da resistência à tração e à compressão das argamassas. A influência negativa dos AR nas propriedades mecânicas das argamassas, deve-se a presença de resíduos de cimento hidratado no AR, proporciona maior absorção de água do que os AN. Quanto a adição de superplastificante, foi relatado que as argamassas com AR apresentaram comportamento à tração na flexão ligeiramente superior as argamassas de referência, especialmente com a substituição de 50%. Por outro lado, a resistência à compressão diminui mais rapidamente.

Ledesma *et al.* (2015) analisaram a relação máxima viável de substituição (25, 50, 75 e 100%) de AN por AR (originada da demolição de alvenarias de tijolos cerâmicos) para a produção de argamassa. A proporção utilizada foi em volume de 1:5 para uma consistência de  $175 \pm 10$  mm. Os resultados mostraram que a incorporação do resíduo afeta as propriedades das argamassas, tanto no estado fresco como no endurecido. Como conclusão, os autores recomendam para ambientes internos um percentual de substituição de no máximo 50%. Para ambientes externos, devem ser realizados estudos para confirmar a influência de elevados percentuais de substituição na durabilidade da argamassa.

Martínez *et al.* (2016) observaram o efeito da incorporação da fração fina de AR provenientes de RCD na produção de argamassas de revestimento à base de cimento, com traços 1:3 e 1:4; e com teor de substituição de 50%, 75% e 100%. Foram

utilizados três tipos de agregado, sendo a base de: concreto, misto e de cerâmica. Em geral, as argamassas com os três tipos de AR apresentaram desempenho inferior quando comparadas com as argamassas com AN, no entanto, dentro dos limites estabelecidos por normas e fabricantes. A argamassa com AR de concreto apresentou melhores propriedades, seguida da argamassa com agregado misto e agregado cerâmico, respectivamente. Por fim, os autores concluem que é viável a substituição 100% da AN por AR.

Muñoz-Ruiperez *et al.* (2016) estudaram a influência da adição de AR. Para tanto, foram produzidas argamassas com AN, com dois tipos de argila expandida e dois tipos de AR, sendo um constituído de concreto (oriundo da demolição de concreto pré-moldado, denominado de ARC) e outro constituído por fração mista (originado de uma usina de reciclagem, denominado de ARM). O traço base foi de 1:4 em massa e a quantidade de água foi determinada de acordo com a consistência estabelecida por norma europeia. A princípio, foram dosadas argamassas com substituição de 75% do AN por dois tipos de argila expandida. Posteriormente, à estas argamassas, foram adicionados os dois tipos de AR. Os traços especificamente utilizados foram: 1: 0,83: 0,19: 0,87 (cimento, argila expandida 2/4, argila expandida 3/8 e ARC, respectivamente) e relação a/c de 0,76; e 1:0,83:0,19: 0,76 (cimento, argila expandida 2/4, argila expandida 3/8 e ARM, respectivamente) e relação a/c de 0,81. Os resultados mostraram que houve um aumento da relação a/c com a adição dos AR, sendo maior para os ARM, o que resultou em uma maior porosidade destas argamassas e, por consequência, diminuição da resistência mecânica. Os autores ressaltam ainda que, em geral, o desempenho das argamassas contendo AR é um pouco inferior às argamassas com AN e que as características dos agregados, tais como, absorção de água, teor de finos, a presença de argamassa aderir às partículas, o teor de enxofre e a presença de impurezas, determinam a qualidade dos materiais produzidos.

Restuccia *et al.* (2016) investigaram a incorporação de AR (oriunda de uma usina de reciclagem italiana), na condição seca e lavada, em argamassas. Foram utilizados também, AN padronizados, filler calcário como enchimento e superplastificante. A proporção utilizada para as misturas foi de 1:3 em peso, para uma relação a/c de 0,5. As substituições foram de 50% e 75% da AN pela AR seca e de 25% e 50% da AN pela AR lavada. Nestas últimas misturas, foram adicionados

filler calcário. Com base nos resultados, os autores observaram que as argamassas com AR seca apresentaram consistência seca, enquanto que as argamassas com AR lavada eram muito fluídas. Em geral, a incorporação das duas areias recicladas ocasionou diminuição da resistência mecânica das argamassas, entretanto, a utilização de 50% de AR lavada, conjuntamente com o aditivo superplastificante, apresentou melhores resultados.

Diante dos resultados apresentados nestas pesquisas, percebe-se que a utilização de AR, independente da fração utilizada, é viável para a produção de argamassas. Todavia se faz necessário conhecer as propriedades dos AR utilizados, tendo em vista sua grande variabilidade e propriedades que diferem dos AN.

## CAPÍTULO 3

## Programa experimental

## 3.1 Materiais

## 3.1.1 Cimento

Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o cimento Portland composto com pozolana e resistente a sulfatos (CP II-Z-RS), fabricado pela Lafarge. As propriedades químicas, físicas e mecânicas desse material são apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Composição química do cimento Portland CP II-Z-RS

Ensaio	NBR	Unidade	Resultado	Especificações da NBR 11578/97
Perda ao fogo (950°C)	NM 18/12	%	4,52	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	NBR 16/12	%	2,72	≤ 4
Resíduo insolúvel (RI)	NM 15/12	%	10,60	≤ 16
Óxido de magnésio (MgO)	NM 14/12	%	2,15	≤ 6,5
Óxido de cálcio (CaO)	NM 13/13	%	1,43	Não aplicável

Fonte: Lafarge Holcim<sup>2</sup>

Tabela 3.2 – Composição física e mecânica do cimento Portland CP II-Z-RS

Ensaio	NBR	Unidade	Resultado	Especificações da NBR 11578/97
Área específica (Blaine)	NM 76/15	cm <sup>2</sup> /g	3748	≥ 260
Resíduo na peneira de 75 µm	11579/13	%	4,5	≤ 12
Tempo de início de pega	NM 65/03	min	193	≥ 60
Expansibilidade a quente	11582/12	mm	0,17	≤ 5
Resistência à compressão (3 dias)	7215/97	MPa	23,5	≥ 10
Resistência à compressão (7 dias)	7215/97	MPa	30,0	≥ 20
Área superficial (BET)	-	m <sup>2</sup> /g	3,28	Não se aplica
Massa específica	NM 23/01	g/cm <sup>3</sup>	3,15	Não se aplica
Massa unitária	NM 46/03	kg/dm <sup>3</sup>	1,04	Não se aplica

Fonte: Lafarge Holcim<sup>3</sup>

Na Figura 3.1 é possível observar a granulometria do cimento utilizado. O seu diâmetro médio é de 27,70 µm e 50% de suas partículas possui diâmetro inferior a 23,30 µm. A granulometria do cimento é um importante parâmetro, pois influencia na

<sup>2,4</sup> Dados fornecidos pelo fabricante referente ao boletim de análise do cimento realizado em agosto/2016, com exceção da área superficial (BET) e a massa específica e unitária que foram aferidas de acordo com a NBR NM 23 (2001) e NBR NM 45 (2006), respectivamente.

quantidade de água requerida pela mistura, assim como conduz o seu empacotamento.

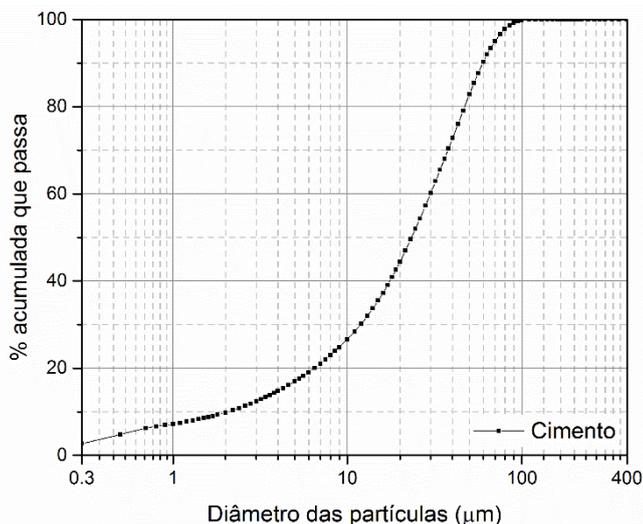


Figura 3.1 – Granulometria do Cimento Portland (CP II Z)

A escolha deu-se em função de ser um cimento comumente empregado na região da grande Natal/RN e por ser o mesmo utilizado pela obra onde os revestimentos foram avaliados. O cimento foi devidamente armazenado e estocado em local seco, coberto e fechado, visando protegê-lo contra as intempéries e evitar sua hidratação e, conseqüentemente, conservar suas propriedades.

### 3.1.2 Cal

A cal utilizada foi hidratada do tipo CH-I, classificada de acordo com a norma NBR 7175 (2003). A Tabela 3.3 apresenta a caracterização química e física da cal hidratada utilizada, fornecida pelo fabricante (exceto a massa específica e a massa unitária).

Na Figura 3.2, observa-se a sua granulometria, onde o diâmetro médio das partículas é 2,77 µm, sendo cerca de dez vezes menor do que o do cimento. Possui ainda, 50% de suas partículas com diâmetro inferior a 2,17 µm. Comparado ao cimento, nota-se que a cal possui granulometria significativamente menor do que o cimento.

Tabela 3.3 – Caracterização química e física da cal hidratada

Caracterização química			
Ensaio	Resultado (%)	Ensaio	Resultados (%)
RI HCL	0,10 – 0,52	SO <sub>3</sub>	0,020 – 0,056
SiO <sub>2</sub>	0,20 – 0,40	PPC	20,50 – 23,33
CaO Total	66,00 – 72,04	Umidade	0,80 Max
MgO Total	0,75 – 1,50	CO <sub>2</sub>	0,10 – 2,00
CaO disp.	65,00 – 70,00	Ca (OH) <sub>2</sub>	85,00 – 94,00
CaO + MgO não hidratados	0,75 – 10,00	Água combinada	19,97
Óxidos totais base não voláteis	90,00 – 95,83	CaO comb. CaCO <sub>3</sub>	0,12 – 1,90
CaO combinado com CaSO <sub>4</sub>	0,040 – 0,080	CaO hidratado	62,10
Caracterização física			
Área superficial (m <sup>2</sup> /g)		BET	6,74
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 23/01	2,30
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )		NBR NM 46/03	0,42
Finura (% Retida Acumulada)		0,600 mm	0,00
		0,075 mm	0,00 – 1,2

Fonte: Mineração Ouro Branco<sup>4</sup>

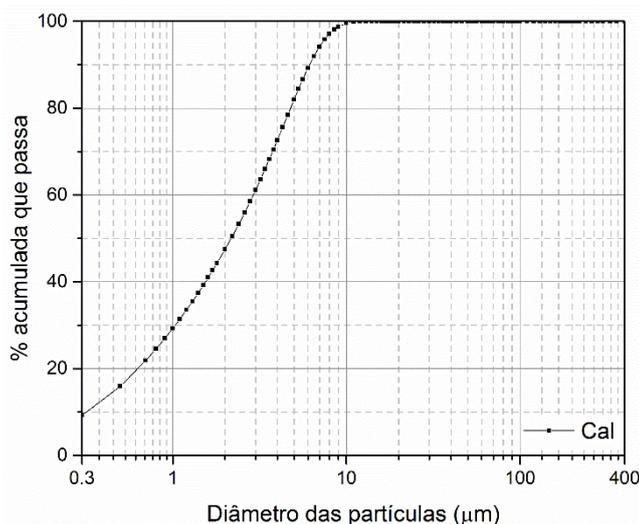


Figura 3.2 – Granulometria da cal hidratada (CH-I)

A escolha desse dessa cal foi em decorrência de sua maior pureza e por ser o mesmo aglomerante utilizado pela obra onde os revestimentos foram produzidos e avaliados.

### 3.1.3 Agregado miúdo

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados dois tipos de agregados miúdos, sendo: AN fina (utilizada para reboco), coletada na condição lavada e extraída por dragagem em rio localizado no município de Ielmo Marinho/RN.

<sup>4</sup> Dados fornecidos pelo fabricante referente a agosto/2016, com exceção da área superficial (BET) e massa específica e unitária que foram determinadas de acordo com a NBR NM 23 (2001) e NBR NM 45 (2006), respectivamente.

Assim como os aglomerantes utilizados nesta pesquisa, a AN foi fornecida pela obra onde os revestimentos foram produzidos e avaliados.

A AR utilizada para a produção das argamassas foi fornecida pela Duarte Usina de Reciclagem de Resíduos de Construção Civil Ltda., localizada no município de São José de Mipibu/RN, microrregião de Macaíba, distante cerca de 40 km de Natal/RN. A obtenção da AR foi através da britagem de RCD, devidamente isentos de impurezas e contaminantes, cuja fração obtida possuía grãos inferiores a 4,75 mm e composição basicamente de materiais cimentícios (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Composição do AR do RCD

Fração mineral	Descrição	% em massa*
Cinza	Concreto e argamassa	72,43
Vermelha	Material cerâmico e torrões de argila	9,32
Rochas	Sem/pouca argamassa aderida	17,64
Gesso	-	0,55
Outros	Isopor, madeira, papel, etc.	0,05

\* A Composição foi determinada com base na análise visual e separação manual do material retido na peneira de 2,36 mm da AR.

### 3.1.4 Água

A água utilizada na produção das argamassas foi potável, proveniente da rede de distribuição que abastece a Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, campus Natal/RN.

### 3.2 Métodos

Para determinar e avaliar as propriedades de argamassas e dos revestimentos produzidos com AR de RCD, em comparação com o AN, foi esquematizado o programa experimental, conforme é apresentado na Figura 3.3. Inicialmente, os AR foram coletados e, juntamente com os outros materiais, foram caracterizados. Por conseguinte, foram definidas as proporções e os percentuais de substituição a serem utilizados na produção das argamassas e revestimentos. Finalmente, as propriedades no estado fresco e endurecido foram avaliadas e os seus resultados analisados.

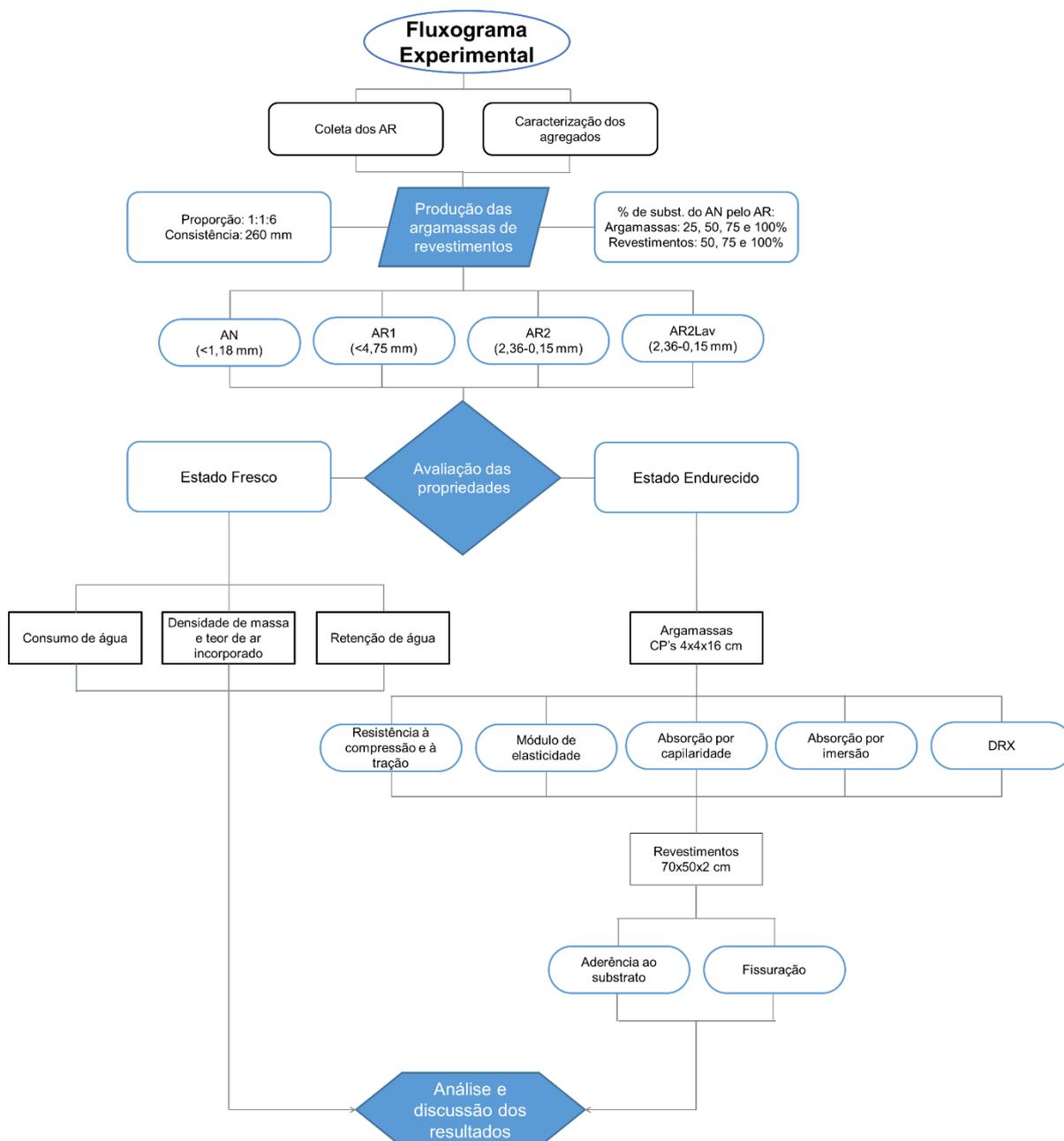


Figura 3.3 – Fluxograma geral do programa experimental

### 3.2.1 Coleta dos agregados reciclados

As areias recicladas foram coletadas (diretamente das pilhas e das correias de transporte) de acordo com a NBR NM 26 (2009), e juntamente com as areias naturais, foram secas em estufa ( $105 \pm 5$ ) °C por 48 horas e, posteriormente, resfriadas à temperatura ambiente. Após esse procedimento, foi realizada a redução das amostras por quarteamento com base na NBR NM 27 (2001) até a obtenção da quantidade de material necessária para realização de cada ensaio.

### 3.2.2 Caracterização dos agregados

As AN e AR, e seus respectivos finos (<0,15 mm), foram caracterizadas quanto as suas propriedades físicas, químicas e microestruturais. Os métodos utilizados são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Ensaio realizados para a caracterização dos agregados

Ensaio	Propriedade	Método	NBR
Agregados (<4,75 mm)	Distribuição granulométrica	Peneiramento	NM 248/2003
	Massa unitária	Recipiente cilíndrico com volume conhecido	NM 45/2006
	Massa específica	Chapman	9776/1988
	Teor de Material pulverulento	Lavagem dos agregados	NM 46/2003
	Absorção de água por imersão	Grãos totalmente imersos por 48 h	-
	Torrões de argila e materiais friáveis	-	7218/2010
	Inchamento dos grãos	-	6467/2009
	Teor de argamassa aderida	Dissolução HCL	-
Finos dos agregados (<0,15 mm)	Distribuição granulométrica	Laser	-
	Área superficial	BET	-
	Análise Microscópica	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	-
	Análise química	Florescência de Raios-X (FRX)	-
	Análise Mineralógica	Difração de Raios-X (DRX)	-
	Índice de atividade pozolânica	Resistência à compressão	5751/2015 e 5752/2014

Os ensaios de caracterização física e química dos agregados foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LABMATCON), vinculado ao Departamento de Engenharia Civil. As análises de BET, FRX, DRX e MEV foram realizadas nos laboratórios pertencentes ao Departamento de Engenharia e Ciência dos Materiais. E o ensaio de granulometria a laser foi realizado do Laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais – LMCME, do Departamento de Física Teórica e Experimental – DFTE. Ressalta-se que todos os laboratórios citados estão localizados no Núcleo Tecnológico da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Na Tabela 3.5 encontram-se listados os ensaios realizados, bem como os métodos e normas utilizadas. Todavia, alguns ensaios e análises requerem descrição quanto aos procedimentos e condições adotados. Assim, a seguir será explicado sucintamente os métodos utilizados para tais ensaios.

- **Absorção de água dos agregados**

O ensaio de absorção por imersão dos agregados consistiu em colocar uma amostra de 500 g submersa em água durante 48 horas (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Agregados imersos em água

Após esse período, com o auxílio de uma bomba à vácuo, retirou-se a água superficial da amostra e pesou-se ( $m_u$ ). Em seguida, colocou-se para secar, até constância de massa, em estufa à 105°C ( $m_s$ ).

A absorção por imersão dos agregados foi calculada através da Equação 3.1:

$$A = \left( \frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde:

$A$  = absorção de água dos agregados (%);

$m_u$  = massa úmida (g);

$m_s$  = massa seca (g).

- **Teor de argamassa**

O ensaio para a determinação do teor de argamassa dos AR (<4,75 mm), teve como objetivo avaliar a presença em sua superfície de argamassa/pasta cimentícia que são facilmente corroídos por ácido clorídrico (HCl). Devido à natureza alcalina dos ligantes, a utilização de ácidos proporciona facilmente sua remoção dos agregados,

técnica essa, amplamente utilizada para o tratamento de AR de concreto (AKBARNEZHAD; ONG, 2013). O procedimento foi realizado da seguinte forma:

- i. Secou-se as frações granulométricas resultantes do peneiramento da AR por 24h;
- ii. Determinou-se uma massa inicial ( $m_i$ ) de 5,0 gramas de cada fração para reagir com uma concentração de 1:3 (HCl:água deionizada). Preparou-se então, uma solução com 500 ml, sendo 125 ml de HCL e 375 ml de água deionizada;
- iii. Em seguida, cada fração granulométrica de massa inicial de 5 g, foi coberta por 20 ml da solução de HCl, isto é, 4 ml por grama de amostra e agitada mecanicamente por 35 minutos.
- iv. Após esse processo, as amostras foram filtradas com o auxílio de bomba à vácuo, secas em estufa por 48 h e sua massa final determinada ( $m_f$ ).
- v. Com as massas iniciais e finais, o teor de argamassa, em porcentagem, foi calculado através da Equação 3.2.

$$\text{Teor de argamassa (\%)} = \left( \frac{m_f - m_i}{m_f} \right) \cdot 100 \quad (3.2)$$

Onde:

$m_i$  = massa inicial da amostra;

$m_f$  = massa final após a secagem da amostra.

- **Granulometria a laser**

O ensaio de granulometria a laser dos finos dos agregados foi realizado através de um granulômetro de difração a laser do tipo CILAS (modelo 920L). A água foi utilizada como fluido de circulação e não foi utilizado nenhum tipo de agente dispersante. A faixa granulométrica adotada no equipamento foi de 0,30  $\mu\text{m}$  - 400,  $\mu\text{m}$ /30 Classes, ultrassom 60s.

- **Área superficial por BET**

Á área superficial dos finos dos agregados foram determinados a partir da adsorção física do nitrogênio sobre os materiais pelo método de Brunauer-Emmett-

Teller (BET). As análises foram realizadas em um equipamento BEL JAPAN, modelo BELSORP-mini II. O BET é um dos métodos mais usuais para a caracterização de pós e consiste na medida da adsorção física de um gás inerte (geralmente  $N_2$ ), onde-se através da isoterma de BET, obtém-se a área específica do material.

- **Análise microestrutural por MEV**

As micrografias foram obtidas com o objetivo de avaliar a forma e a textura superficial dos agregados naturais e reciclados, por meio do equipamento da marca Hitachi, modelo TM-3000.

- **Análise química por FRX**

As análises químicas dos finos dos agregados foram realizadas por FRX através do método semiquantitativo e sob atmosfera à vácuo. Para tanto, utilizou-se o equipamento do fabricante SHIMADZU, modelo EDX-720.

- **Análise mineralógica por DRX**

Na análise mineralógica por DRX foi utilizado um equipamento Shimadzu DRX 6000. As amostras foram submetidas as seguintes condições de análise: radiação  $ka$  de um anodo de cobre ( $I = 1,54056 \text{ \AA}$ ), 40 kV e 30 mA. Os resultados foram obtidos com a velocidade do goniômetro de  $1,5^\circ/\text{min}$ , faixa de varredura ( $2\theta$ ) de  $5-70^\circ$ , passo de varredura 0,02% e tempo por passo de 1s.

### **3.2.3 Produção das argamassas**

Com o intuito de definir o traço utilizado na pesquisa, foram analisados, inicialmente, três dosagens em volume: 1:1:6, 1:2:9 e 1:1:7 (cimento, cal e agregado). Estes traços foram escolhidos por serem comumente utilizados na maioria das obras da região metropolitana de Natal/RN e também por serem utilizados pela empresa parceira ao projeto, onde foram produzidos os painéis de revestimento argamassados.

Como o objetivo era avaliar a influência da utilização de AR nas propriedades de argamassas, havia a necessidade de se definir um traço a partir do qual se iria variar as porcentagens de substituição do AN pelo AR, não sendo foco desta pesquisa, a dosagem da argamassa.

Portanto, o parâmetro de escolha do traço a ser utilizado nesse estudo, baseou-se em avaliar as propriedades de resistência de aderência à tração e a fissuração dos três traços (1:1:6, 1:2:9 e 1:1:7) com 100% de substituição do AN pelo AR, verificando qual demonstraria melhor resultado nessas propriedades e depois aplicar as variações de substituição de 0, 25, 50, 75 e 100% em apenas um dos traços acima citados.

A partir da etapa anterior, definiu-se o traço 1:1:6 (em volume de areia úmida, posteriormente transformado para massa de areia seca), visto que obteve melhor resistência de aderência à tração, parâmetro essencial para as argamassas de revestimento. Os resultados da análise e definição dos traços podem ser encontrados em Ferreira *et al.* (2016).

Não obstante a isso, e com a premissa de reduzir a fissuração e melhorar o acabamento superficial dos revestimentos com AR, que outrora foi observado, optou-se por beneficiar e lavar a AR produzida pela usina de reciclagem. Portanto, foram utilizadas para a produção das argamassas e revestimentos três variações de AR (Figura 3.5), sendo:

- **AR1:** AR conforme produzida pela usina de reciclagem (grãos com dimensões inferiores a 4,75 mm);
- **AR2:** baseada na anterior (AR1), porém com suas dimensões limitadas entre 2,36 e 0,15 mm;
- **AR2Lav:** variação é AR2, porém com a retirada do material fino. Para tanto, foi realizada através da lavagem em água corrente e sobre peneira de 0,15 mm.



Figura 3.5 – Areias recicladas utilizadas na produção das argamassas

Sendo assim, para os estudos de desempenho das argamassas de revestimentos com substituição do AN pelo AR utilizaram-se os traços apresentados na Tabela 3.6. Esses traços são em massa e em relação ao consumo de materiais para produzir de 1m<sup>3</sup> de argamassa, tendo sido calculado a partir do traço em volume (1:1:6:a/c), utilizando as massas específicas dos materiais. Onde a/c é a relação água/cimento obtida no ensaio de consistência.

Tabela 3.6 – Consumo de materiais por m<sup>3</sup> das composições das argamassas

Traços*	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )						a/c
	Cimento	Cal	AN	AR1	AR2	AR2Lav	
100AN	231,7	93,6	1507,5	-	-	-	1,36
25AR1	227,3	91,8	1109,3	380,2	-	-	1,39
50AR1	219,5	88,7	714,2	734,3	-	-	1,50
75AR1	215,4	87,0	350,4	1080,9	-	-	1,54
100AR1	209,2	84,5	-	1399,8	-	-	1,63
25AR2	230,8	93,2	1126,5	-	363,7	-	1,37
50AR2	226,9	91,6	738,3	-	715,1	-	1,44
75AR2	223,1	90,1	362,9	-	1054,5	-	1,50
100AR2	218,7	88,3	-	-	1378,1	-	1,59
25AR2Lav	228,9	92,4	1117,0	-	-	360,7	1,41
50AR2Lav	225,7	91,2	734,3	-	-	711,3	1,47
75AR2Lav	224,6	90,7	365,3	-	-	1061,4	1,50
100AR2Lav	219,1	88,5	-	-	-	1380,9	1,61

\* Os números indicam a porcentagem de agregado no traço e a sigla AN, AR1, AR2 ou AR2Lav, o tipo de agregado utilizado. Por exemplo: o traço denominado de “100AN”, possui 100% do agregado natural (ou 0% de substituição do AN pelo AR); o “25AR1”, 25% de substituição do AN pelo AR1; e assim, sucessivamente.

Para a produção das argamassas (moldadas em laboratório) utilizou-se os 5 percentuais de substituição anteriormente citados, porém para a produção dos revestimentos argamassados foram utilizados os percentuais de 0%, 50%, 75% e 100%, de modo a avaliar seu desempenho com níveis maiores de substituição.

A preparação das argamassas consistiu-se, inicialmente, na maturação da cal, com uma antecedência de 24 horas. Para a mistura, foi utilizada uma argamassadeira de cuba inoxidável com capacidade para cinco litros. A sequência adotada para a realização da mistura está descrita a seguir:

- i. Inicialmente, adicionou-se toda a água da mistura e os agregados na cuba. Em seguida, misturou-se mecanicamente em velocidade baixa por 30 segundos;

- ii. Após esse período, adicionou-se a cal e misturou-se, em velocidade lenta, por 60 segundos;
- iii. Esse conjunto foi, então, pesado para posterior correção da água perdida na evaporação e, em seguida, armazenado por 24 horas em sacos plásticos de forma a manter sua umidade;
- iv. Após o período de maturação da cal, a mistura foi novamente pesada e acrescentada a água eventualmente perdida na evaporação;
- v. Por fim, adicionou-se o cimento e realizou-se uma mistura de um minuto em velocidade baixa e um minuto em velocidade alta.

### 3.2.4 Propriedades das argamassas no estado fresco

Os ensaios para determinação das propriedades físicas das argamassas no estado fresco foram executados, segundo as normas vigentes, conforme especificado na Tabela 3.7 e descritos brevemente a seguir.

Tabela 3.7 – Ensaio realizados nas argamassas no estado fresco

Propriedade	Método	NBR
Consumo de água	Mesa de consistência	13276/2005
Densidade de massa e teor de ar incorporado	Molde cilíndrico	13278/2005
Retenção de água	Funil Büchner modificado	13277/2005

Com a definição das proporções dos materiais, foi possível realizar o preparo da mistura e determinar a quantidade de água para a consistência de 260 mm, de acordo com as prescrições da NBR 13276 (2005) – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência”.

A água foi adicionada gradativamente em quatro pontos na mesma mistura, iniciando com uma consistência seca, que resultou em um pequeno diâmetro na mesa de consistência, até o último ponto com diâmetro de no máximo 265 mm, conforme especificado para argamassas de revestimento. Com esses resultados, foi possível traçar o gráfico que relaciona o espalhamento com a relação água/materiais secos e, assim, determinar a quantidade ideal de água para a argamassa atingir o espalhamento especificado.

Posteriormente a determinação da quantidade de água para a realização do amassamento, as argamassas foram submetidas aos ensaios de caracterização no estado fresco.

Além do índice de consistência, foi determinado a densidade de massa e o teor de ar incorporado (Figura 3.6 (a) e (b)), ambos de acordo com as prescrições da NBR 13278 (2005) e a retenção de água das argamassas (Figura 3.6 (c)), conforme especificações da NBR 13277 (2005).

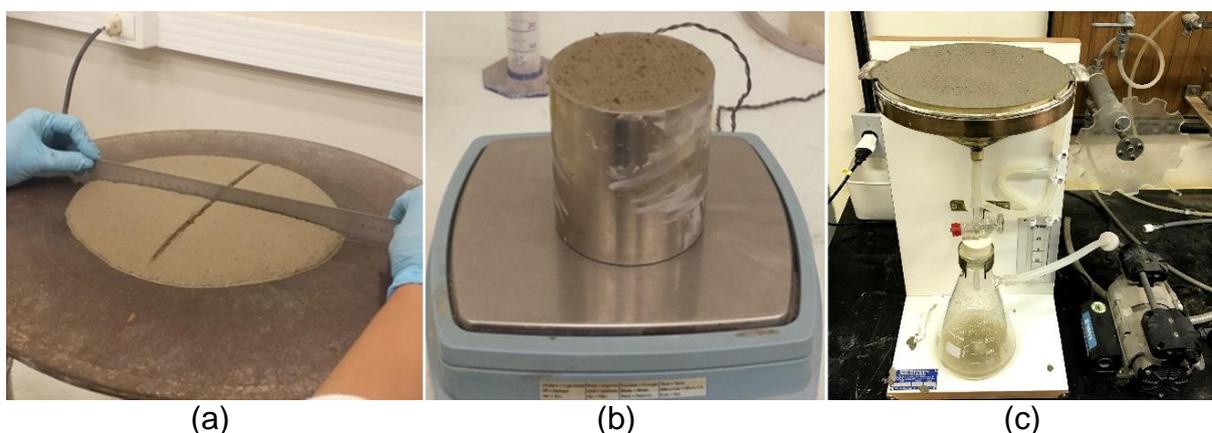


Figura 3.6 – Ensaios de (a) consistência, (b) densidade de massa e (c) retenção de água das argamassas no estado fresco

### 3.2.5 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados em duas camadas, adensadas, inicialmente com 20 golpes com soquete metálico e 6 quedas livre realizada na mesa de consistência. Posteriormente, uniformizou-se a superfície dos moldes, retirou-se o excesso de material e aplicou-se mais 6 quedas livre na mesa de consistência, totalizando 9 quedas.

Durante as primeiras 48 horas, a superfície dos corpos de prova foi protegida com uma placa de vidro para evitar a rápida evaporação da água de amassamento. Após este período, realizou-se a desmoldagem, mantendo os corpos de prova em temperatura ambiente até as idades de 28 e 91 dias. Para cada ensaio realizado no estado endurecido foram moldados 4 corpos de prova nas dimensões de 40x40x160 mm.

### 3.2.6 Propriedade das argamassas no estado endurecido

Os ensaios para a determinação das propriedades das argamassas e dos revestimentos no estado endurecido foram realizados conforme as normas vigentes, como pode-se observar na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Ensaios realizados para a caracterização das propriedades das argamassas e revestimentos no estado endurecido

Propriedade	Método	NBR	Qtd. de CP/traço
Tempo de propagação de onda ultrassônica	Aplicação direta de transdutores	8802/2013	4
Densidade de massa	Moldes prismáticos	13280/2005	4
Capacidade de absorver deformações	Módulo de elasticidade dinâmico	15630/2009	4
Resistência à tração na flexão	Prensa	13279/2005	4
Resistência à compressão	Prensa	13279/2005	4
Porosidade aberta	Absorção de água por imersão	9778/2009	4
Coefficiente de capilaridade	Absorção de água por capilaridade	15259/2005	4
Aderência à tração	Arrancamento	13528/2010	12
Fissuração	Comprimento linear	-	1

#### 3.2.6.1 Resistência à compressão e à tração na flexão

Os ensaios de resistência à compressão e a tração na flexão foram realizados de acordo com a NBR 13279 (2005), em prensa universal (Shimadzu, modelo Autograph AG-X), com velocidade de carregamento de 500 N/s e 50 N/s, respectivamente. A distância entre os suportes de apoio do ensaio de tração na flexão foi de 100 mm. As idades características que os ensaios serão realizados será aos 28 e 91 dias.

Primeiramente, os corpos de prova foram rompidos à tração na flexão (Figura 3.7 (a)) e, na sequência, fazendo-se o uso de suas metades, os mesmos foram rompidos à compressão axial (Figura 3.7 (b)), totalizando 4 amostras para o ensaio de resistência à tração e 8 para resistência à compressão. As amostras utilizadas nestes ensaios foram as mesmas utilizadas para aferição do módulo de elasticidade dinâmico.



Figura 3.7 – Ensaio de resistência à (a) tração na flexão e à (b) compressão axial

### 3.2.6.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico é obtido pela Equação 3.3, assim como descreve a NBR 15630 (2009).

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (3.3)$$

Onde,

$E_d$  – Módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

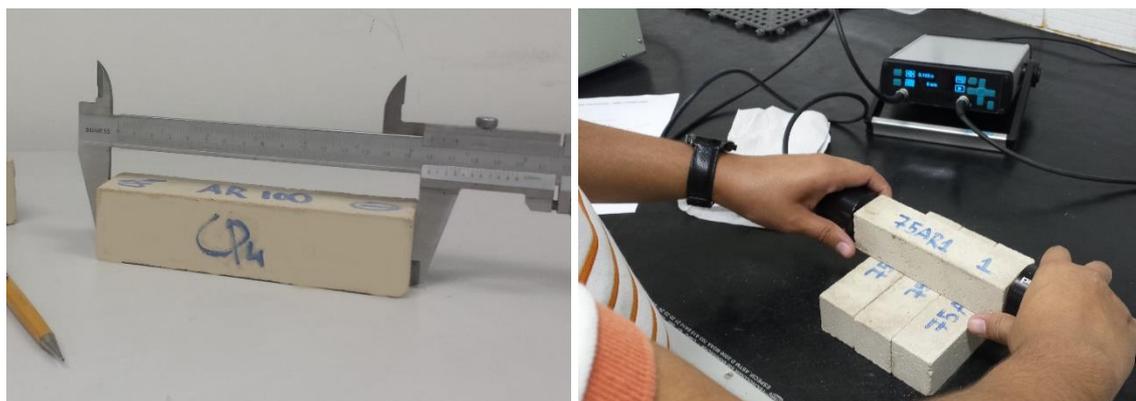
$v$  – Velocidade de propagação de onda ultrassônica (mm/ $\mu$ s);

$\rho$  – Densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m<sup>3</sup>);

$\mu$  – Coeficiente de Poisson.

De acordo com Carneiro (1999), para argamassas o coeficiente de Poisson varia de 0,10 a 0,20, sendo tanto menor quanto menor for a capacidade de deformação da argamassa. Foi adotado para esta pesquisa o valor de 0,20.

A densidade de massa foi obtida de acordo com a NBR 13280 (2005) (Figura 3.8 (a)). O pulso elétrico de baixa frequência foi obtido de um aparelho de ultrassom (*Pundit Lab+* modelo 32610001 da marca Proceq), conforme a NBR 8802 (2013) e a transmissão foi por meio de transdutores de 54 kHz e forma direta de leitura (Figura 3.8 (b)). Assim, com os resultados obtidos a partir desses dois ensaios, foram obtidos os módulos de elasticidade dinâmico das argamassas com idade de 28 dias.



(a)

(b)

Figura 3.8 – Ensaio realizado para o cálculo do módulo de elasticidade: (a) dimensões sendo medidas e (b) aferição da velocidade de propagação de onda

Para o referido ensaio, foram utilizados 4 corpos de prova para cada traço produzido, ressaltando que foram os mesmos utilizados para a densidade de massa, velocidade de propagação de onda ultrassônica e, por conseguinte, módulo de elasticidade dinâmico.

### 3.2.6.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado de acordo com a NBR 15259 (2005), com o intuito de avaliar a permeabilidade capilar das argamassas estudadas.



Figura 3.9 – Absorção de água por capilaridade das argamassas

O ensaio consistiu, inicialmente em lixar e limpar a face dos corpos de prova que estava em contato com a água. Posteriormente, foi determinado as massas secas das amostras e, em seguida, colocadas em um recipiente metálico, sobre uma tela de borracha e uma lâmina de água de 5 mm (Figura 3.9).

Os corpos de prova foram pesados nos tempos de 10, 30, 60, 90, 150, 210, 270, 330 e 1440 minutos. A absorção de água e o coeficiente de capilaridade foram calculados, respectivamente, através das Equações 3.4 e 3.5.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (3.4)$$

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (3.5)$$

Onde:

$A_t$  = absorção de água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>);

$m_t$  = massa do corpo de prova no tempo previsto (g);

$m_0$  = massa seca do corpo de prova (g);

$m_{10}$  = massa aos 10 minutos de imersão do corpo de prova (g);

$m_{90}$  = massa aos 90 minutos de imersão corpo de prova (g);

$C$  = Coeficiente de capilaridade (g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>).

#### 3.2.6.4 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado aos 28 dias de idade e de acordo com a NBR 9778 (2009). Inicialmente, os corpos de prova foram secos em estufa à (105±5) °C, por 72 horas. Decorrido esse período, determinou-se a massa seca ( $m_s$ ) de cada corpo de prova e, em seguida, os mesmos foram saturados em água por 72 horas à temperatura ambiente. Após a saturação, os corpos de prova foram colocados em banho térmico durante 5 horas e depois resfriados. Por fim, com o auxílio de uma balança hidrostática, foi determinada a massa imersa ( $m_i$ ) e a massa saturada ( $m_{sat}$ ).

A absorção de água das argamassas ( $A_{bs}$ ) foi calculada por meio da Equação 3.6. E para determinar o volume de poros das argamassas em relação ao seu volume, isto é, o índice de vazios ( $I_v$ ), foi utilizada a Equação 3.7.

$$A_{bs} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.6)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3.7)$$

$A_{bs}$  = Absorção de água por imersão das argamassas (%);

$I_v$  = Índice de vazios das argamassas (%);

$m_{sat}$  = massa da amostra saturada após imersão e fervura (g);

$m_s$  = massa da amostra seca em estufa (g);

$m_i$  = massa da amostra imersa em água após fervura (g).

### 3.2.6.7 Resistência de aderência à tração e fissuração das argamassas de revestimento

A execução dos revestimentos argamassados utilizados para avaliação do potencial de aderência ao substrato e a fissuração dos revestimentos, foi realizada conforme as prescrições da NBR 7200 (1998), porém a mistura foi realizada de forma manual, com o auxílio de uma enxada e colher de pedreiro, tendo em vista que não foi possível realizá-la mecanicamente devido ao pouco volume de argamassa produzido. Dessa forma, adotou-se para todos os traços a seguinte sequência de mistura:

- i. Mistura de todos os componentes anidros (aglomerantes e agregados), por aproximadamente 2 minutos;
- ii. Em seguida, adição gradativamente da água e até que a mistura adquirisse consistência adequada para sua aplicação. A mistura foi realizada por aproximadamente 3 minutos, totalizando 5 minutos.

Os revestimentos foram executados em um substrato de alvenaria de blocos de concreto, devidamente chapiscados com antecedência. Os painéis possuíam dimensões internas de 70x50x2 cm (largura, altura e espessura), como pode-se observar na Figura 3.10.

Foram, portanto, produzidos revestimentos argamassados com percentuais de substituição de 0%, 50%, 75% e 100% do AN pelo AR para serem avaliados quanto ao surgimento de fissuras e ao potencial de aderência ao substrato. Ambos os ensaios foram avaliados também segundo as especificações da NBR 13749 (2013).



Figura 3.10 – Execução dos revestimentos para posteriormente ser realizado resistência de aderência à tração e avaliação da fissuração

A avaliação da susceptibilidade à fissuração dos revestimentos foi realizada através do comprimento linear de fissuras visíveis por metro quadrado de parede vestida. Assim, aos 28 dias, visto que nos revestimentos com AR são propensos ao surgimento de fissuras por retração (MIRANDA; SELMO, 2006; RUDNITSKI; NAKANISHI; MOHAMAD, 2014; MARTÍNEZ *et al.*, 2016) foi aferido o comprimento linear das fissuras que por ventura surgiram nos revestimentos.

O ensaio para a determinação da resistência de aderência à tração foi realizado aos 56 dias, devido as argamassas possuírem cal e, sobretudo, por possuírem AR, acreditando assim, que as reações ocorrem em menor velocidade e, conseqüentemente, os resultados obtidos nesta idade expressariam com maior significância a aderência dos revestimentos ao substrato. A sua execução seguiu os procedimentos prescritos na NBR 13528 (2010) e basicamente foram utilizados: pastilha metálica (diâmetro de 50 mm e espessura de 10 mm), serra copo, cola à base de resina epóxi e aparelho de tração (dinamômetro da marca Controls). Com antecedência de 24 horas, foi realizado corte à seco de 6 amostras nos revestimentos com a serra copo, seguido da limpeza das superfícies e colagem das pastilhas. Findado esse período, aplicou-se um esforço de tração com taxa de carregamento de 250 N/s até a ruptura dos corpos de prova e, conseqüentemente, a determinação da carga de ruptura. Na ocasião, também foi determinado, através da extração de três testemunhos, o teor de umidade em cada revestimento.

### 3.2.7 Viabilidade econômica

A viabilidade econômica foi avaliada com base no custo estimado para a produção de 1 m<sup>3</sup> de argamassa. Para tanto, utilizou-se a Equação (3.8), os consumos de materiais apresentados na Tabela 3.4 (item 3.2.3) e adotou-se o preço médio comumente praticado na microrregião de Natal/RN (referente ao mês de janeiro/2017).

$$Custo/m^3 = C_c \times \$_c + C_{cal} \times \$_{cal} + C_{AN} \times \$_{AN} + C_{AR} \times \$_{AR} \quad (3.8)$$

Onde,

$C_c$  e  $\$_c$  – Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>) e preço do kg de cimento (R\$ 0,4/kg);

$C_{cal}$  e  $\$_{cal}$  – Consumo de cal (kg/m<sup>3</sup>) e preço do kg de cal (R\$ 0,6/kg);

$C_{AN}$  e  $\$_{AN}$  – Consumo de AN (kg/m<sup>3</sup>) e preço do kg de AN (R\$ 40/m<sup>3</sup>);

$C_{AR}$  e  $\$_{AR}$  – Consumo de AR (kg/m<sup>3</sup>) e preço do kg de AR (R\$ 30/m<sup>3</sup>) para os AR1 e AR2 e R\$ 33/m<sup>3</sup> para o AR2Lav.

## CAPÍTULO 4

## Resultados e discussões

### 4.1 Caracterização dos agregados

#### 4.1.1 Caracterização física

##### 4.1.1.1 Composição granulométrica

Os resultados da composição granulométrica das areias estão expostos na Tabela 4.1 e suas respectivas curvas granulométricas, inclusive das misturas das AN e AR, estão apresentadas, respectivamente, nas Figuras 4.1 (a), (b), (c) e (d).

Tabela 4.1 – Análise granulométrica dos agregados utilizados

Abertura da peneira (mm)	% retida				% retida acumulada			
	AN	AR1	AR2	AR2Lav	AN	AR1	AR2	AR2Lav
4,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,36	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	6,5	0	0,04
1,18	0,3	10,9	18,9	31,2	0,3	17,4	18,9	31,28
0,6	2,9	15,0	21,8	26,5	3,2	32,4	40,7	57,79
0,3	43,4	33,4	35,8	28,4	46,6	65,8	76,5	86,23
0,15	39,4	23,9	22,3	13,3	86,0	89,7	98,8	99,54
Fundo	14,0	10,3	1,2	0,5	100,0	100,0	100,0	100,0

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.1, observa-se que as areias apresentam composições granulométricas diferentes, especialmente quando se compara a AN com as AR. O AN possui maior quantidade de material retido nas peneiras com abertura de 0,3 mm e o fundo, enquanto que as AR apresentam maior quantidade de material retido nas peneiras com abertura de 1,18 mm a 0,6 mm, indicando, portanto, que a AN possui grãos menores quando comparada as AR.

Ao analisar a influência do percentual de substituição do AN pelo AR, verifica-se nas Figuras 4.1 (b), (c) e (d), que as misturas que contém AR possuem retas com menor ângulo de inclinação, sugerindo a princípio, que sua incorporação proporciona melhor distribuição dos grãos.

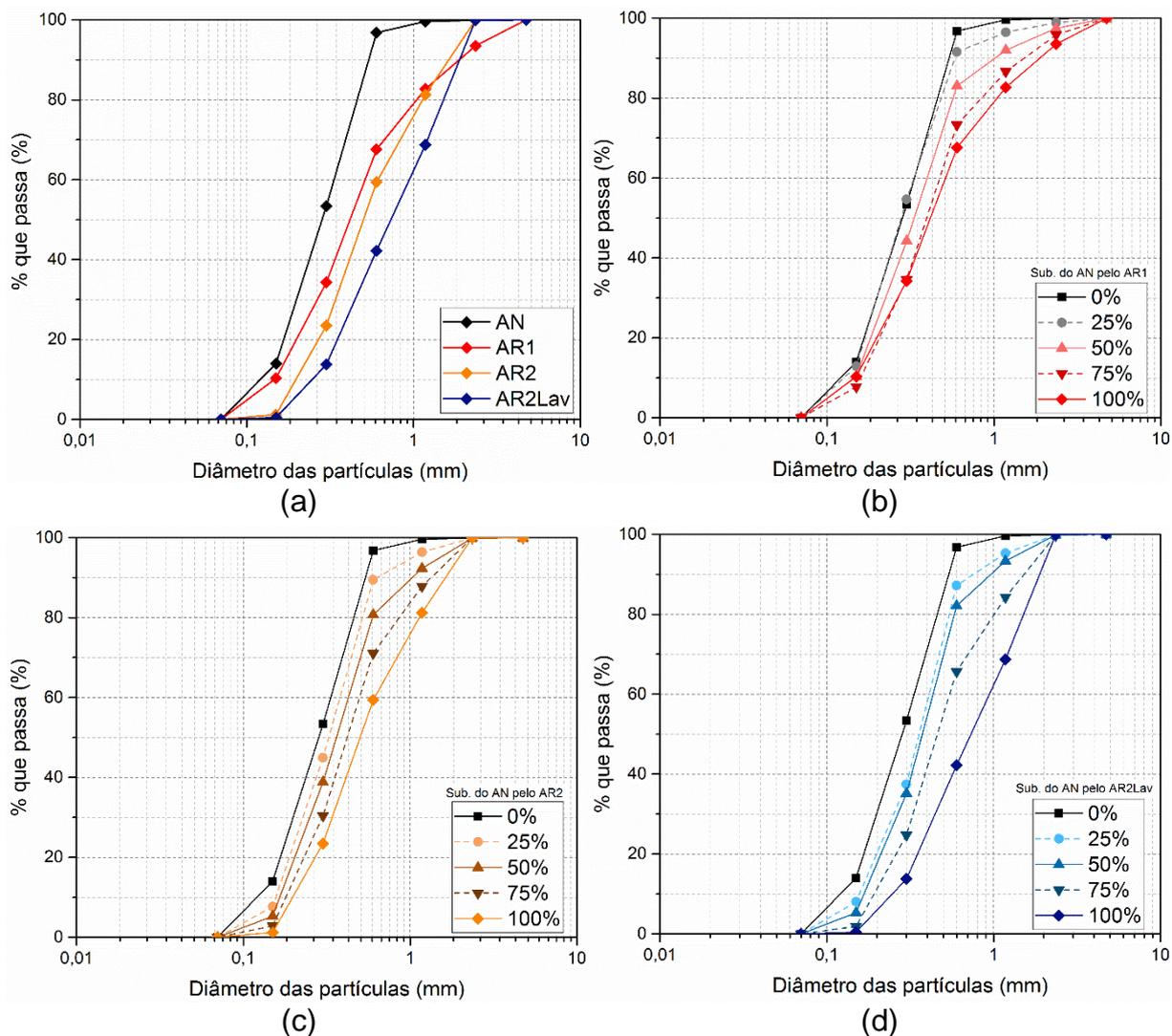


Figura 4.1 – Curvas granulométricas das (a) areias utilizadas e das substituições do AN (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) pelo (b) AR1, (c) AR2 e (d) AR2Lav

Entretanto, para classificar as curvas granulométricas em uniforme ou desuniforme, utilizou-se o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) oriundo da mecânica dos solos, e definido pela Equação 4.1.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4.1)$$

Onde:

$D_{60}$  e  $D_{10}$  – Correspondem à abertura de malha em que passam 60% e 10%, respectivamente, em massa de material total peneirado, tomados na curva granulométrica.

Considera-se na mecânica dos solos que areias são muito uniformes quando possuem  $C_u < 5$ , de uniformidade média quando  $5 < C_u < 15$ , e menos uniforme, quando  $C_u > 15$  (PINTO, 2006). Os coeficientes de uniformidade das areias são mostrados na Figura 4.2.

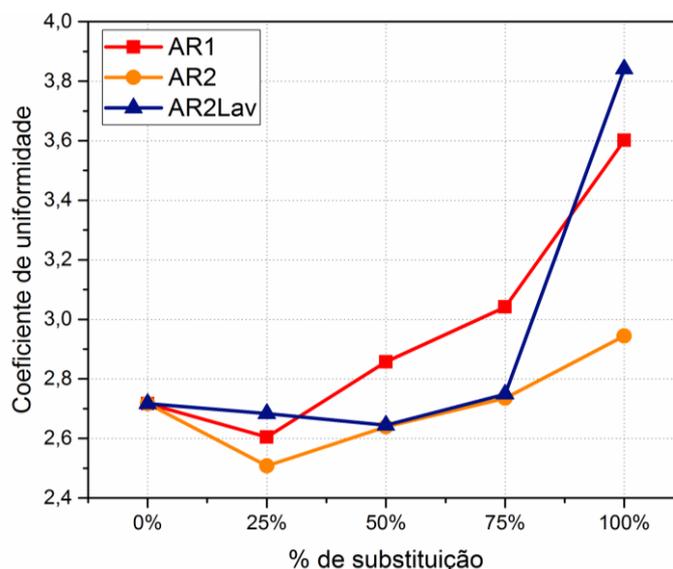


Figura 4.2 – Coeficiente de uniformidade das areias utilizadas na produção das argamassas em função do percentual de substituição

Analisando os resultados apontados na Figura 4.2, nota-se que todas as composições dos agregados apresentam coeficiente de uniformidade inferior a 5 e, portanto, podem ser classificadas, quanto ao seu comportamento granulométrico, como sendo muito uniformes. Contudo, a incorporação das AR a partir de 25% de substituição resultou em um aumento linear do coeficiente de uniformidade, sobretudo para as composições que possuíam AR1 e AR2. Para as misturas com a AR2Lav, nas substituições de 25 e 50%, ocorreu uma diminuição linear de 1% e 3%, respectivamente do coeficiente de uniformidade. Para as substituições de 75% ocorreu um aumento 1% e para substituição de 100% o aumento do coeficiente de uniformidade chegou a cerca de 41%, sendo esta última substituição a que apresentou melhor resultado (3,84).

Assim, para as composições estudadas, a incorporação das AR proporcionou melhor distribuição dos grãos e, por conseguinte, melhor empacotamento. Resultados similares foram obtidos nos trabalhos de Silva (2004), Martínez *et al.* (2013) e Araújo (2014), onde os autores observaram que os AR obtidos de usinas de reciclagem, cuja produção é realizada por britagem, apresentam uma distribuição de tamanho de

partícula contínua, permitindo, portanto, uma maior interação entre as partículas e, deste modo, maior compactação.

#### 4.1.1.2 Propriedades físicas

Na Tabela 4.2 estão dispostos os resultados da caracterização física da AN e das AR, onde constata-se que as areias estudadas possuem dimensões máximas características diferentes, especialmente quando se compara a AN com as AR. Esses resultados eram esperados, uma vez que são agregados obtidos de formas diferentes, sendo um extraído naturalmente de rios e outros obtidos da britagem de resíduos.

Tabela 4.2 – Propriedades físicas dos AN e AR utilizados

<b>Propriedades</b>	<b>AN</b>	<b>AR1</b>	<b>AR2</b>	<b>AR2Lav</b>
Dimensão máxima (mm)	0,6	4,75	2,36	2,36
Módulo de finura (MF)	1,36	2,12	2,35	2,75
% de finos (<0,15 mm) (%)	14,0	10,3	1,2	0,5
Teor de material pulverulento (%)	2,0	7,0	2,65	-
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,50	1,38	1,30	1,30
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,64	2,52	2,53	2,56
Coefficiente de inchamento	1,33	1,19	1,19	1,19
Absorção de água (%)	5,94	17,14	15,12	14,15
Torrões de argila e materiais friáveis (%)	-	1,82	2,17	2,17

Ressalta-se, que a adequação das características das AR à da AN inviabilizaria a produção dos AR nas usinas de reciclagem, tendo em vista que existem hoje vários tipos de AN com diferentes propriedades. Além disso, o grande objetivo desta pesquisa foi avaliar a influência da substituição de AR em composições de argamassas contendo materiais comumente utilizados na região de Natal/RN, buscando sobretudo, viabilizar, em escalas maiores, a sua utilização na produção de materiais de construção.

Em termos de classificação e com base no módulo de finura, as AR podem ser classificadas em médias e a AN em fina, segundo a NBR 7211 (1983). Do ponto de vista de execução de revestimentos argamassados, principalmente quando a finalidade é a produção de reboco, não é desejável a utilização de areias grossas, pois grãos de maiores dimensões dificultam o acabamento final, resultando, portanto, em revestimentos com superfícies ásperas e rugosas. Todavia, a utilização de areias finas demanda maior quantidade de água para a realização das misturas e, assim, em revestimentos com menor desempenho.

Outro aspecto importante, é a quantidade de finos presentes, determinados nesta pesquisa pelo material passante na peneira de 0,15 mm (#100) e pelo material passante na peneira de 0,075 mm (#200) através da lavagem (teor de material pulverulento, associado neste trabalho, ao pó aderido aos grãos dos AR). Identifica-se então, que a AN apresentou maior teor de finos (14%) quando comparada com as AR. Entretanto, em relação a AR1 e AR2, a AN obteve menor teor de material pulverulento. Esses resultados eram esperados e são justificados pela composição granulométrica e origem da AN. O baixo teor de material pulverulento contribui para a obtenção de grãos com superfícies limpas e, conseqüentemente, contribui para a aderência entre os agregados e a pasta de cimento, porém, o teor de finos implica em misturas que demandam maior quantidade de água e, por isso, em materiais com desempenho inferior tanto no estado fresco quanto no endurecido.

Apesar de possuírem menor quantidade de finos (<0,15 mm) quando comparados com as AN, as AR1 e AR2 possuem maior quantidade de material pulverulento (<0,075 mm). Ambos os finos das AR, possuem maior área específica, logo as misturas, seja de argamassa ou concreto, necessitarão de maior quantidade de água para sua produção.

Com base nos resultados da composição granulométrica das misturas dos agregados (Tabela 4.1), foram obtidos seus respectivos teores de finos, conforme pode-se observar na Figura 4.3.

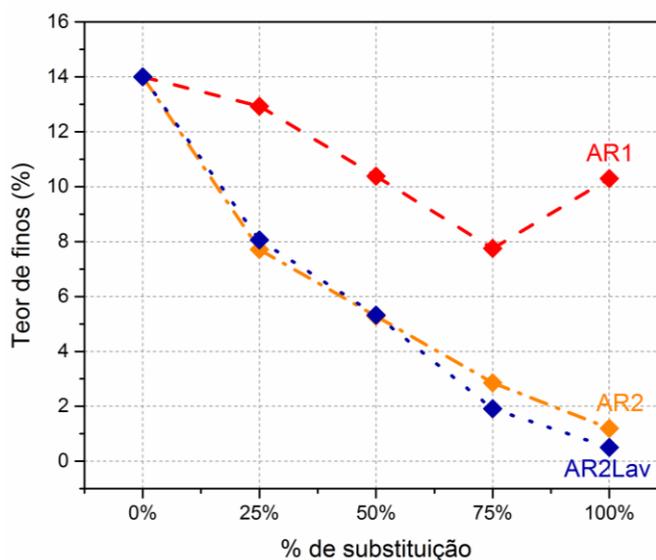


Figura 4.3 – Teor de finos (<0,15 mm) das composições com 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de AR

A composição com 100% de AN (0% de AR), seguida das composições com AR1 (em todos os percentuais de substituição), são as misturas que possuem maior quantidade de finos. No geral, a incorporação dos AR resultou em diminuição da quantidade de finos, em comparação a mistura de referência (100% AN). Em relação as composições com as AR2 e AR2Lav, percebe-se que esse comportamento é mais significativo, o que era esperado tendo em vista que as duas AR passaram por processo de beneficiamento. Ainda assim, observa-se a presença de pequenas quantidades de finos nestas composições que, neste caso, deve-se à quebra de partículas durante a realização do ensaio de granulometria. Para percentuais de substituição de até 50%, as composições com AR2Lav são as que obtiveram maior quantidade de finos. A partir de 75%, o efeito é inverso e as composições com AR2, passam a ser as misturas com maior quantidade de finos.

Miranda e Selmo (2003) afirmam que a principal razão para o surgimento de fissuras em revestimentos de argamassas é a maior quantidade de finos dos AR, que podem desenvolver maiores tensões capilares internas, devido possivelmente, a diminuição do tamanho dos poros e, conseqüentemente, provocar maiores desequilíbrios entre as tensões capilares internas e o ambiente. Em contrapartida, os finos melhoram a zona de transição entre a matriz o agregado (CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; CABRAL *et al.*, 2010; SILVA; BRITO; DHIR, 2016) e contribuem para a compacidade das misturas (NENO; BRITO; VEIGA, 2014; SAMIEI *et al.*, 2015; SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

As AR apresentaram massas específicas e unitárias inferiores ao normalmente encontrado na literatura para AN, o que também foi observado por outros autores, entre eles Jochem (2012) e Ledesma *et al.* (2015). A maior massa unitária da AN deve-se, possivelmente, a forma dos seus grãos, que por serem mais arredondados do que os grãos da AR (angulosos e alongados), confere um melhor preenchimento dos vazios em função menor atrito, que por sua vez, proporciona um maior rolamento dos grãos e, assim, maior será a massa unitária.

A menor massa específica das AR era esperado, por se tratar de um material com diferentes propriedades e composições mineralógicas, dentre as quais se destaca a elevada porosidade dos materiais que os compõem, especialmente argamassa e materiais cerâmicos.

Os resultados de massa específica obtidos nessa pesquisa são semelhantes aos obtidos por outros autores ao estudarem a incorporação de AR de fração mista em materiais cimentícios (PEDROZO, 2008; MALTA; SILVA; GONÇALVES, 2013; ASSUNÇÃO; CARVALHO; BARATA, 2013; STEFANIDOU; ANASTASIOU; FILIKAS, 2014; GEORGIADI, 2014; CALCADO, 2015; MUÑOZ-RUIPEREZ *et al.*, 2016) e superiores aos obtidos por Martínez *et al.* (2013), Jiménez *et al.* (2013), Corinaldesi e Moriconi (2009) e Martínez *et al.* (2016). Essas variações ocorrem devido à grande heterogeneidade e a qualidade do resíduo processado para a obtenção dos AR mistos.

A massa específica dos AR tem relação direta com os materiais constituintes. Ângulo *et al.* (2004) cita que os AR quando constituídos predominantemente de rochas naturais envolvidas por uma camada de pasta de cimento endurecida, apresentam massa específica superior a 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Deste modo, os AR estudados apresentam composição predominante de agregados envolvidos por pasta, o que confirma os resultados da composição do AR, cujo percentual da fração cinza foi superior a 70%. À vista disso, notou-se que o beneficiamento e a lavagem do AR favoreceram o aumento das massas específicas destes agregados, o que é coerente pois houve remoção dos finos e pó do aderido aos grãos, que são materiais de menor massa específica.

Os três tipos de AR apresentaram maior capacidade de absorção de água do que o AN, o que de fato já era previsto em função da porosidade dos materiais que os constituem. Normalmente, encontra-se na literatura taxas de absorção de água para AR menores do que os obtidos neste trabalho. No entanto, Malta, Silva e Gonçalves (2013), Girardi (2016) e Pedrozo (2008) chegaram a valores próximos aos obtidos nesse estudo (16,35%, 12,01% e 10,6%, respectivamente). A presença de grandes quantidades de partículas de argamassa aderida aos grãos (AGRELA; ALAEJOS; JUAN, 2013; EVANGELISTA *et al.*, 2015; YILDIRIM; MEYER; HERFELLNER, 2015) e a presença de materiais cerâmicos (LIMA, 1999; BOURSCHEID; SOUZA, 2010), contribuem para o aumento substancial da absorção de água destes agregados. Portanto, a maior absorção de água significa a existência de maior porosidade, o que influi na resistência mecânica, nas propriedades físicas, na absorção de água e massa específica aparente de concretos e argamassas (MIRANDA, 2005; JOCHEM, 2012).

Segundo Ângulo (2000) e Aguiar (2004), os AR que apresentam maior absorção de água, exibem menor massa específica que, por sua vez, justificam as argamassas com AR apresentarem maior porosidade. Essas afirmações foram também observadas nesta investigação, onde com o aumento das massas específica dos AR a absorção de água diminuiu (Figura 4.4), confirmando, portanto, a relação entre a absorção de água e a massa específica.

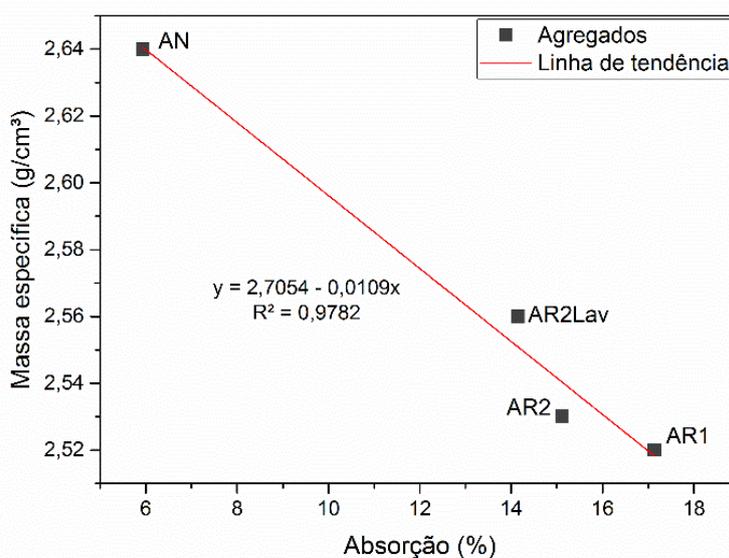


Figura 4.4 – Relação entre a massa específica e a absorção dos agregados

Silva, Brito e Dhir (2014) citam que, independente da fração que compõe os AR, isto é, misto ou cinza, à medida em que se diminui o seu tamanho, maior a absorção de água. Logo, a diminuição da absorção de água dos AR2 e AR2Lav em relação ao AR1, ocorre em função da eliminação dos finos e do material pulverulento que, por possuírem maior área superficial, absorvem maior quantidade de água.

A AN não apresentou teor de argila e materiais friáveis, o que é justificável em função de sua natureza, enquanto que as AR apresentaram, devido à presença alguns materiais como torrões de argila, solos aglomerados e gesso, o que para Ledesma *et al.* (2015) resulta em um aumento da quantidade de partículas que podem ser quebradas durante a produção de argamassas. Ressalta-se ainda, que embora as AR tenham apresentado torrões de argila e materiais friáveis, os resultados foram inferiores ao limite de 3% estabelecido pela NBR 7211 (2009).

Essa menor rigidez dos AR deriva de sua porosidade e, por consequência, o rompimento interno da estrutura de concretos e argamassas ocorre no agregado e

não na zona de transição. No entanto, os materiais produzidos com este tipo de agregado, apresentarão baixa resistência à abrasão (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

#### 4.1.1.3 Análise estatística das propriedades físicas dos AR

Ao longo desta investigação, 35 amostras de AR foram coletadas (entre os meses de fevereiro e dezembro de 2015) e caracterizadas através de ensaios físicos com o intuito de avaliar a variabilidade de sua produção para fins de correlação. Estas propriedades são módulo de finura, massa unitária, teor de material pulverulento e massa específica.

A partir destes dados foram construídas as curvas de distribuições normais (Figura 4.5 (a), (b), (c) e (d)) e obtidos os parâmetros estatísticos (Tabela 4.3) para um nível de confiança de 95%.

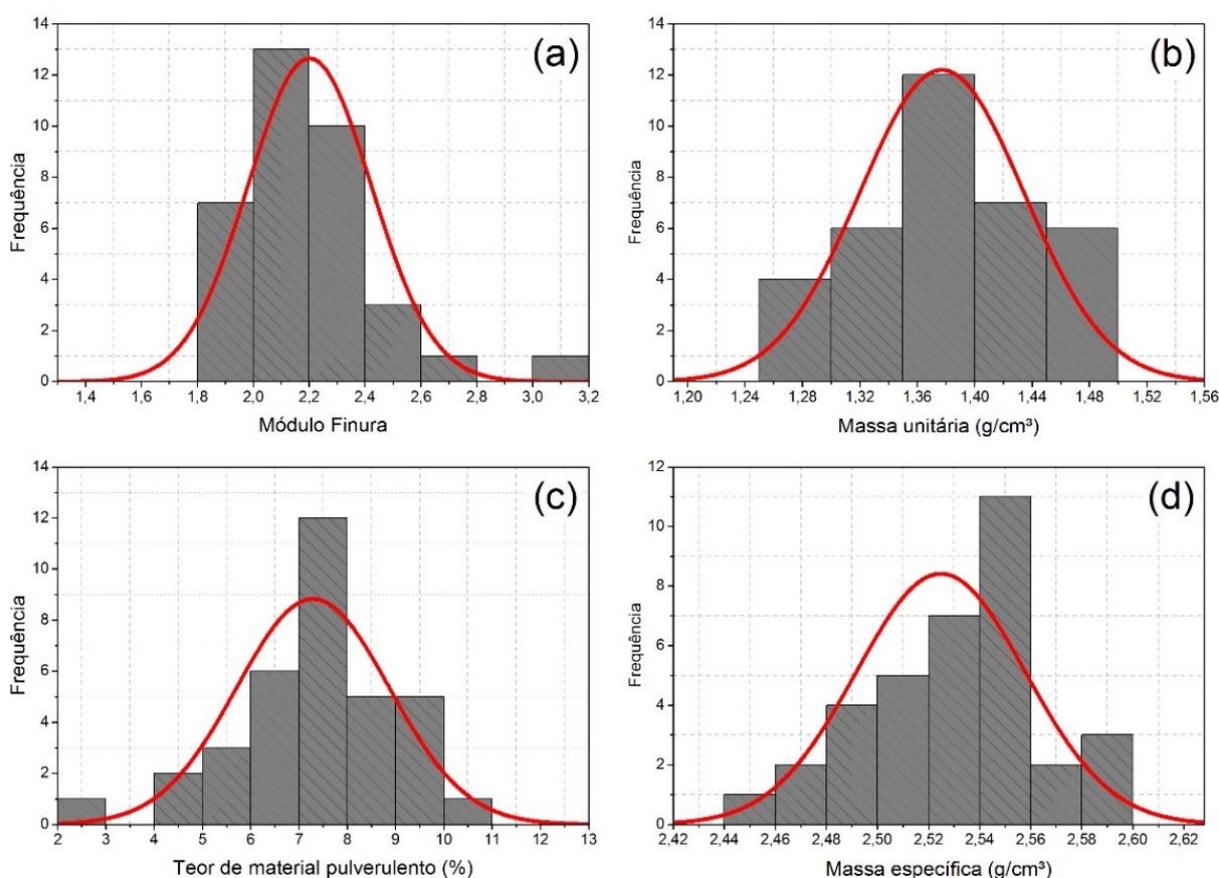


Figura 4.5 – Distribuição normal do (a) Módulo de finura, da (b) Massa unitária, do (c) Teor de material pulverulento e da (d) Massa específica dos AR

Do ponto de vista estatístico, é possível determinar se os dados são normalmente distribuídos por meio da análise do P-valor dado pelo teste Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965; AMARO; SILVESTRE; FERNANDES, 2009), bem como qual a assimetria da distribuição de frequência estudada (RINDSKOPF; SHIYKO, 2010; BUSSAB; MORETTIN, 2013).

Tabela 4.3 – Dados estatístico obtidos da análise das propriedades dos AR

<b>Parâmetros</b>	<b>Teor de material pulverulento (%)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo Finura (MF)</b>
Média	7,291	2,525	1,377	2,202
Erro padrão	0,267	0,006	0,010	0,037
Mediana	7,320	2,530	1,365	2,170
Moda	7,000	2,540	1,380	1,990
Desvio padrão	1,582	0,033	0,057	0,221
Variância da amostra	2,502	0,001	0,003	0,049
Curtose	0,839	0,250	-0,827	4,323
Assimetria	-0,587	-0,526	0,058	1,602
Intervalo	7,300	0,140	0,210	1,110
Mínimo	2,700	2,440	1,270	1,890
Máximo	10,000	2,580	1,480	3,000
Soma	255,180	88,370	48,203	77,060
Contagem	35,000	35,000	35,000	35,000
CV <sub>p</sub> * (%)	21,7	1,3	4,2	10,0
As**	-0,1	-0,5	0,6	0,4
P-valor	0,312	0,079	0,520	0,001
Nível de confiança (95,0%)	0,543	0,011	0,020	0,076

\*CV<sub>p</sub> = coeficiente de variação de Person; \*\*As= Coeficiente de assimetria de Person.

O P-valor pode ser definido como a probabilidade, calculada supondo que a hipótese inicial (H<sub>0</sub>) é verdadeira, de que a estatística de um teste assume um valor tão ou mais extremo do que o valor realmente observado (MOORE, 2005), ou seja, quanto menor o seu valor, mais forte a evidência contrária a H<sub>0</sub> fornecida pelos dados. Dessa forma, o P-valor, obtido pelo teste de Shapiro-Wilk – utilizado para avaliar a normalidade dos dados em amostras pequenas (SHAPIRO; WILK, 1965; AMARO; SILVESTRE; FERNANDES, 2009), deve estar acima do nível de significância ( $\alpha = 0,05$ , nível de significância adotado) para que os dados possuam distribuição normal. Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.3, pode-se observar com um nível de significância de 5%, que todas as propriedades analisadas, exceto o módulo de finura, provêm de uma população com distribuição normal, uma vez que P-valor >  $\alpha$  e assim não se rejeita a H<sub>0</sub> (amostra provêm de uma população com distribuição normal).

Para avaliar o grau de assimetria das distribuições de frequências estudadas, isto é, a intensidade relativa com que a curva de frequência se desvia da assimetria, foi utilizado o coeficiente de assimetria de Person ( $A_s$ ), cujo resultado indica que a curva de frequência possui simetria ( $A_s=0$ ), assimetria positiva ( $A_s>0$ ) e assimetria negativa ( $A_s<0$ ) (TOLEDO; OVALLE, 2012). Os resultados indicaram que todas as amostras analisadas não possuem simetria, entretanto o teor de material pulverulento e a massa específica possuem distribuição assimétrica negativa, enquanto que a massa unitária e o módulo de finura possuem distribuição assimétrica positiva. Esse comportamento também pode ser observado na Figura 4.5.

Analisou-se especificamente a distribuição normal da massa específica dos AR, por ser uma propriedade que influi nas características das argamassas. Tendo em vista que a população amostral analisada apresentou média de  $2,52 \text{ g/cm}^3$  e desvio padrão de  $0,03 \text{ g/cm}^3$ , obteve-se a probabilidade de ocorrência dos seguintes eventos:

- A probabilidade de um evento de massa específica ser maior ou menor do que  $2,50 \text{ g/cm}^3$  (valor considerado adequado e que indica que o AR seja basicamente constituído de fração cinza), é de 25,46%;
- A probabilidade de ocorrência de um evento maior ou menor que a média ( $2,52 \text{ g/cm}^3$ ) é de 50%;
- E considerando as amplitudes máximas e mínimas, tem-se que a probabilidade de um evento ocorrer no intervalo de  $2,49\text{-}2,55 \text{ g/cm}^3$  é de 68,26%.

Dessa forma, nota-se que há uma tendência de que as amostras analisadas apresentem massas específicas dentro do intervalo de amplitudes, o que possivelmente, é um indicativo de que os AR processados pela usina são compostos em maior parte pela fração cinza do RCD (concreto, argamassa e rochas naturais).

Quanto às análises de variação amostral, tem-se que quanto maior o valor do desvio padrão, mais dispersos estão os dados em torno da média. Logo, a massa específica e a massa unitária foram as propriedades que apresentaram menor dispersão dos resultados, confirmando os resultados do erro padrão e da variância das amostras. Com relação as dispersões, observou-se, em função do  $CV_p$ , que o teor de material pulverulento possui média dispersão ( $15\% < CV < 30\%$ ) e as outras propriedades, baixa dispersão ( $CV \leq 15\%$ ).

Ademais, levando em consideração que a massa específica e massa unitária são as propriedades que possuem menor variação de resultados, sugere-se ainda que a AR produzida pela usina de reciclagem em 2015 pode ser utilizada na produção de materiais de construção, uma vez que não há grandes variações em sua composição (associado a massa específica) e em sua distribuição granulométrica (associada a britagem e, conseqüentemente, massa unitária). O teor de material pulverulento, apesar de ser a propriedade com maior variação, sua amplitude amostral máxima (10%) foi inferior ao limite (20%) estabelecido para ARM, segundo a NBR 15116 (2004).

#### 4.1.2 Caracterização dos finos (<0,15 mm) dos agregados

##### 4.1.2.1 Área superficial por BET

Os resultados obtidos a partir do ensaio de BET para os finos dos AN e AR são apresentados na Tabela 4.4. Percebe-se que os finos do AR apresentaram maior área superficial, o que era esperado tendo em vista os resultados obtidos no ensaio de granulometria a laser e por outros autores (CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; CABRAL *et al.*, 2010; NENO; BRITO; VEIGA, 2014; HAWLITSCHKEK, 2014; SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

Tabela 4.4 – Área superficial dos finos do AN e AR

Finos	Área superficial (m <sup>2</sup> /g)
NA	1,227
AR	3,547

A maior área superficial dos AR, justifica a maior absorção de água destes agregados e, por consequência, resulta em uma maior demanda de água na mistura para manter a mesma trabalhabilidade. Por outro lado, a maior área específica dos AR, reflete em uma maior porosidade, proporcionando uma melhor ligação entre o AR e a pasta de cimento, preenchendo assim, alguns poros que, sem a adição de finos, seriam preenchidos por água (VIEIRA; DAL MOLIN; LIMA, 2004; BRITO *et al.*, 2005; JOCHEM; ROCHA; CHERIAF, 2012; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; CABRAL *et al.*, 2010; SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

Deve-se notar que a área superficial dos finos do AR foi superior à do cimento (3,20 m<sup>2</sup>/g), o que é positivo, pois contribui para o efeito de preenchimento dos poros

durante a hidratação da matriz e para as reações pozolânicas, caso haja reatividade do AR com o cimento ou cal.

Tal fato também foi observado por Jiménez *et al.* (2013) e Navrátilová e Rovnaníková (2016), onde esses autores ressaltaram que a atividade pozolânica dos AR de cerâmica aumenta com o aumento de sua área específica. Esses últimos pesquisadores, comentam ainda, que essas reações são favorecidas quando as partículas são menores, pois os finos do AR entram na reação pozolânica com uma superfície de reação maior. Esses relatos são compatíveis com os resultados obtidos nesta pesquisa, onde os finos do AR apresentaram granulometria mais fina e maior área superficial, quando comparados com os finos do AN.

#### 4.1.2.2 Granulometria a laser

Com o objetivo de avaliar o tamanho das partículas inferiores a 150  $\mu\text{m}$ , realizou-se o ensaio de granulometria a laser, cujos resultados estão indicados na Tabela 4.5 e na Figura 4.6.

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de granulometria a laser dos finos

Finos	Tamanho das partículas ( $\mu\text{m}$ )			
	D10	D50	D90	D <sub>médio</sub>
AN	60,47	117,12	220,16	130,64
AR	6,24	55,73	149,68	69,31

Legenda: D10, D50 e D90 = indica a porcentagem de 10, 50 e 90%, respectivamente, de partículas passantes; D<sub>médio</sub> = diâmetro médio da amostra.

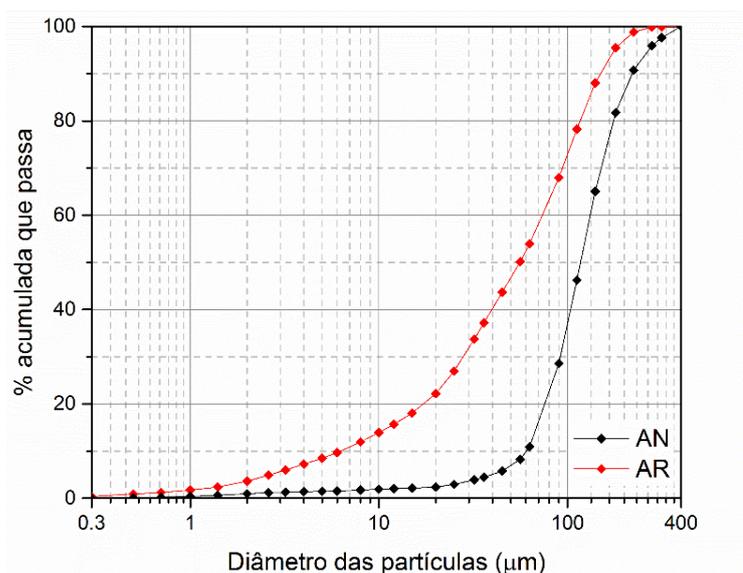


Figura 4.6 – Granulometria dos finos do AN e AR

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.5 e as curvas granulométricas da Figura 4.6, constata-se que os finos do AR possuem menor granulometria, sendo seu diâmetro médio cerca de 47% inferior ao dos finos do AN. Ao analisar a Figura 4.6, observa-se que os finos do AR possuem curva com comportamento contínuo, justificando os resultados do  $D_{\text{médio}}$ , D10 e D50, cujos resultados foram significativamente inferiores aos dos finos do AN. Portanto, os finos do AR possuem partículas com diâmetro menor do que os finos do AN, bem como melhor distribuição de grãos.

A Figura 4.7 permite ainda visualizar a granulometria dos aglomerantes e dos finos utilizados. A cal e o cimento são os materiais mais finos, no entanto os finos do AR se assemelha a granulometria desses materiais, sobretudo a do cimento. Dessa forma, se os finos do AR forem utilizados em misturas que possuem cimento e a cal, sugere-se que este material terá grande influência no que se refere ao empacotamento das partículas.

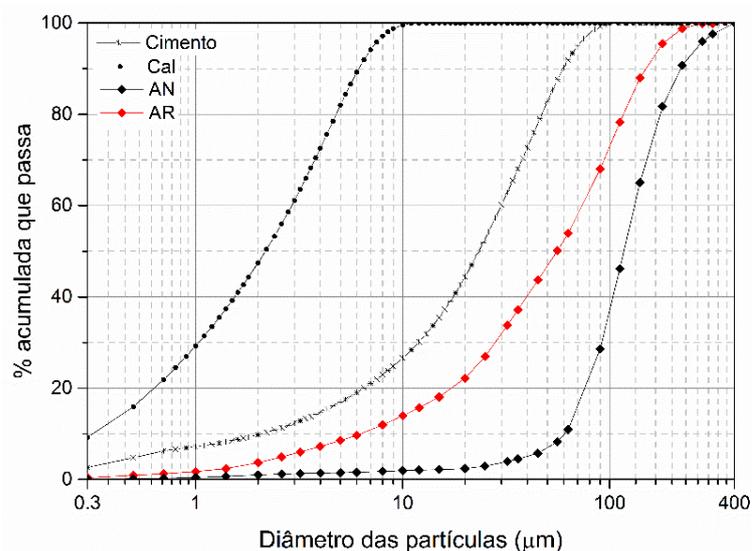


Figura 4.7 – Comparação das curvas granulométricas dos finos do AN e AR com os aglomerantes (cimento e cal)

As misturas de partículas com diferentes tamanhos, conduzem a composições com maior compacidade (empacotamento das partículas) e, portanto, diminui a absorção de água e a porosidade, além de aumentar a densidade (CONTRERAS *et al.*, 2016) e a resistência à compressão da matriz, mesmo que a atividade pozolânica do material seja baixa (ANJOS, 2009).

#### 4.1.2.3 Formato e textura superficial por MEV

Com as imagens obtidas por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da AN e AR (Figuras 4.8), foi possível avaliar o formato e textura superficial destes agregados, parâmetros que influem diretamente nas propriedades das argamassas.

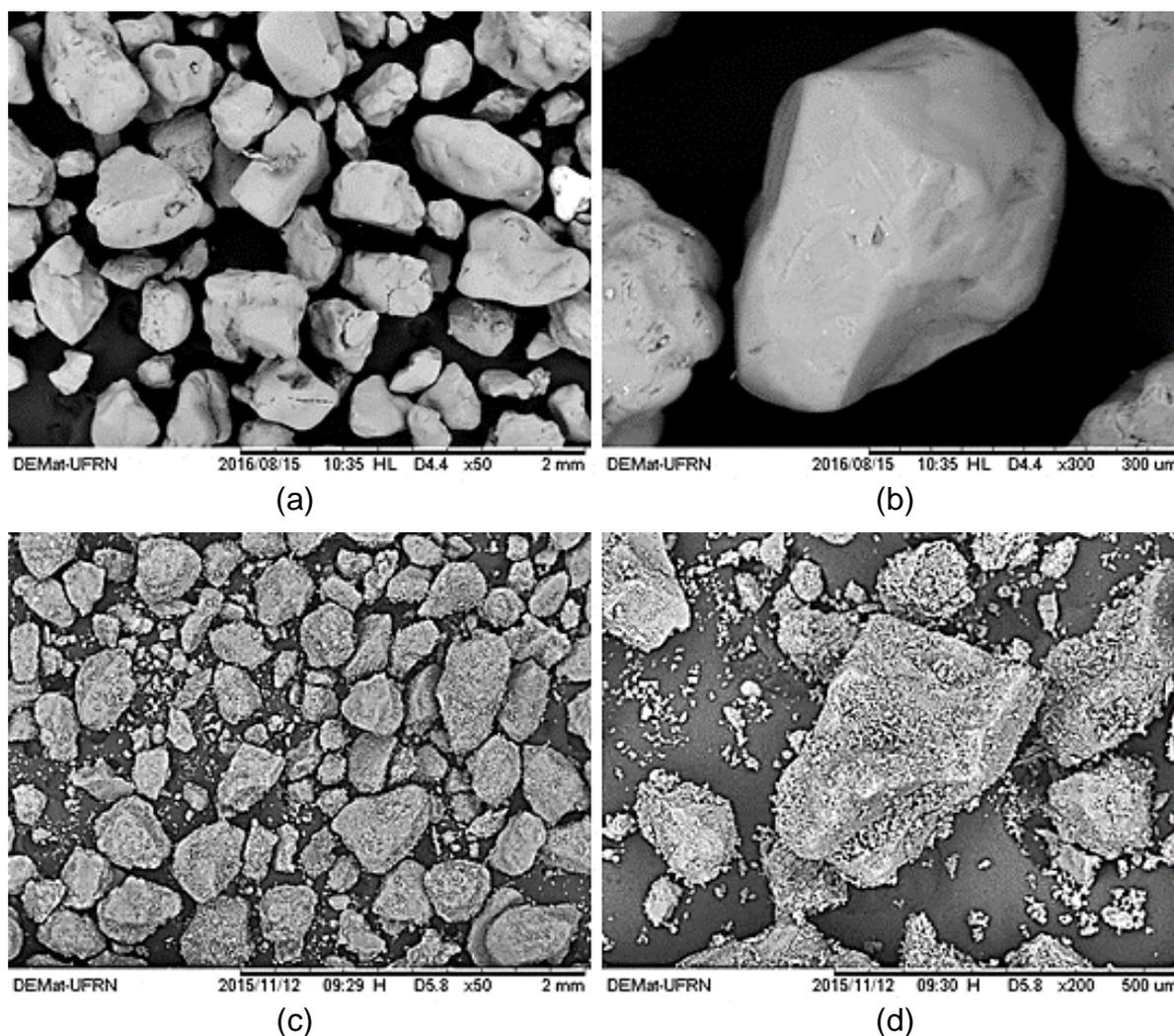


Figura 4.8 – Formato e textura superficial: (a) e (b) dos AN; (c) e (d) dos AR.

Quanto à forma dos agregados, é possível observar nas microscopias que ambos os finos apresentam formato diferente. O AN apresenta morfologia é irregular, porém com arestas e vértices arredondados (Figura 4.8 (a)). Esses resultados se assemelham aos obtidos por Evangelista *et al.* (2015). O AR, por sua vez, possui arestas e vértices mais definidos do que os AN e, portanto, apresentam formato angular em decorrência do processo de britagem. Estes resultados também foram

observados nos estudos de Jochem (2012), Araújo (2014), Behera *et al.* (2014) e Silva, Brito e Dhir (2014).

A textura superficial e a variação de tamanho, são os grandes diferenciais entre esses finos. Os finos do AN apresentam textura lisa e segue, em geral, uma distribuição de tamanho, conforme pode-se observar na Figura 4.8 (a) e (b). Já os finos do AR possuem diversos tamanhos e formas de partículas dispersas, além de apresentam superfície porosa com textura rugosa e áspera (Figura 4.8 (d)), corroborando com as micrografias apresentadas por Evangelista *et al.* (2015) e Li e Yang (2017). Essas variações no tamanho dos finos AR (Figura 4.8 (c)), justifica a quantidade de materiais pulverulentos presentes em AR.

Verificou-se ainda, a possível presença de argamassa aderida aos grãos dos AR (Figura 4.9), o que também foi observado por outros autores (JUAN; GUTIÉRREZ, 2009; MARTÍN-MORALES *et al.*, 2011; ULSEN *et al.*, 2013; BEHERA *et al.*, 2014; EVANGELISTA *et al.*, 2015; LE *et al.*, 2016) e explica o fato dos AR possuírem textura superficial porosa e áspera e, conseqüentemente, elevada absorção de água. Evangelista *et al.* (2015) verificaram através de microscopia realizada em partículas com 125  $\mu\text{m}$ , que o principal constituinte, embora pequenas quantidades de AN sejam observadas, é argamassa.

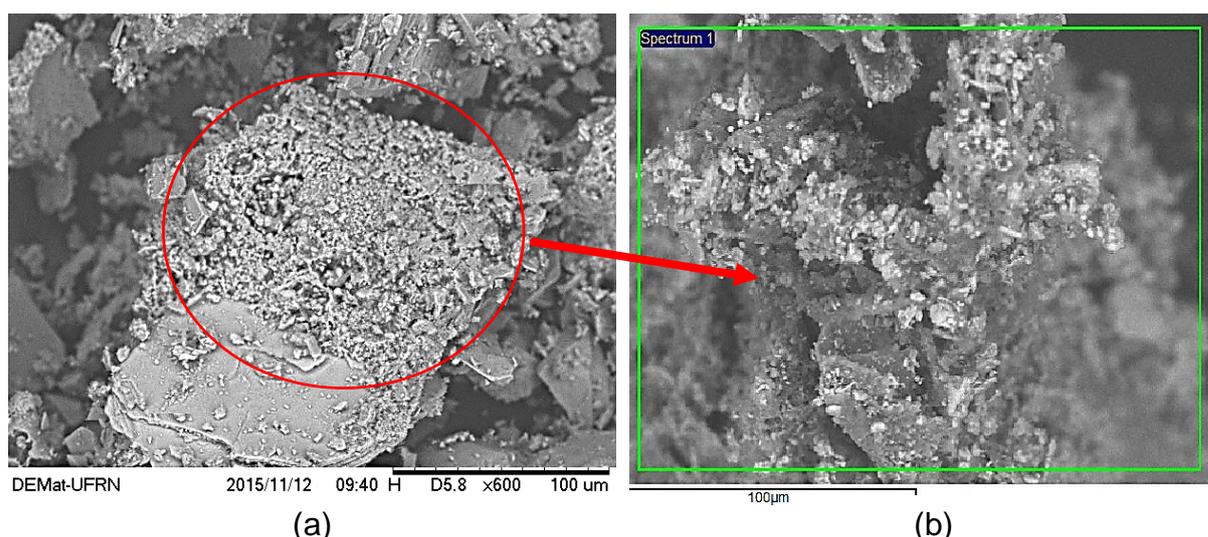


Figura 4.9 – (a) grãos com argamassa aderida à superfície e (b) ampliação da região onde foi realizado o EDS.

As observações feitas pelos autores anteriormente citados, assim como o teor de argamassa dos finos do AR (21,7%, ver Tabela 4.8) e os resultados ilustrados na

Figura 4.9, foram confirmadas na identificação qualitativa dos elementos presentes nos finos do AR, através da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Na região indicada na Figura 4.9 (a) e (b), foram encontrados cálcio (43,28%) e sílica (26,56%) como principais elementos presentes e, em menor quantidade, a presença de alumínio (14,05%), ferro (9,76%) e enxofre (10,53%) foi evidenciada. O alumínio pode ainda estar associado ao sulfoaluminato de cálcio presentes em compostos cimentícios hidratados.

O cálcio, a sílica e o enxofre estão associados a presença de materiais que constituem a argamassa aderida (cimento e agregados) à superfície dos grãos e o alumínio e o ferro, pertencem, possivelmente, a presença de materiais cerâmicos. A argamassa e o material cerâmico que aderem aos grãos de AN afetam diretamente as propriedades físico-mecânicas dos AR, como a densidade das partículas e a absorção de água (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2011).

#### 4.1.2.4 Análise química por FRX

A Tabela 4.6 apresenta a composição química por FRX do AN e do AR, onde obteve-se resultados semiquantitativos em porcentagem de óxidos. Observa-se nas amostras analisadas, a presença em comum de alguns óxidos, contudo em teores distintos.

Tabela 4.6 – Composição química por FRX dos agregados

Finos	% de óxidos (em massa)									
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SrO	ZrO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Outros
AN	95,81	-	2,38	-	0,13	-	-	-	0,94	0,74
AR	40,40	29,83	10,18	8,91	5,03	1,57	1,13	0,99	0,76	1,20

Diferentemente dos AN, os AR apresentam uma maior variedade de componentes químicos devido as diferentes composições dos materiais que os originam. Para os finos do AR, os maiores teores encontrados foram de óxido de sílica (SiO<sub>2</sub>), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), corroborando com os resultados de outras pesquisas (ÂNGULO, 2005; ÂNGULO *et al.*, 2009; SILVA, 2015; MARTÍNEZ *et al.*, 2016). Pode-se então, caracterizar estas amostras como sílico-aluminosas, quanto à composição química. Com relação aos finos do AN, seu elevado teor de óxido de sílica (>95%) evidencia a sua natureza exclusivamente quartzosa.

Ângulo (2005) cita que a origem desses óxidos em AR de RCD está associada a diversos tipos de silicatos que são derivados das partículas de pasta de cimento endurecida e de agregados naturais, rochas naturais, cerâmica vermelha, etc.

Os óxidos de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{CaO}$  presente na composição desses resíduos deve-se, provavelmente, a presença de compostos cimentícios hidratados (concretos, argamassas). Já a presença dos óxidos de ferro e de alumínio, bem como os óxidos de cálcio pode ser justificada devido a presença de produtos cerâmicos. Tais resultados corroboram com os obtidos por Martínez *et al.* (2016) visto que o teor de  $\text{SiO}_2$  foi maior para os AR de concreto e que os teores de  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foram maiores para os AR de origem cerâmica.

Apesar dos baixos teores de óxidos de  $\text{SO}_3$  presentes nos AR, cabe ressaltar, segundo Martínez *et al.* (2016) que este elemento químico pode causar a perda gradual da resistência mecânica e afetar a durabilidade de argamassas produzidas com estes agregados.

#### **4.1.2.5 Análise mineralógica por DRX**

Os difratogramas do AN e do AR são mostrados na Figura 4.10. Os resultados indicaram que o AN possui composição mineralógica composta apenas por fases de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), confirmando os resultados obtidos no FRX.

Já a composição mineralógica do AR é complexa devido à grande variedade de fases cristalinas e amorfas de seus componentes (concreto, argamassa, cerâmica). Todavia, a análise de DRX do AR confirmou a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) como principais fases cristalinas.

O quartzo deriva da presença de rochas naturais. Já a calcita, pode ter diferentes origens, como: a partir de agregados naturais (RESTUCCIA *et al.*, 2016) e de componentes carbonatados (ÂNGULO *et al.*, 2009; ULSEN, 2011; EVANGELISTA *et al.*, 2015) utilizados em concretos e argamassas, como a cal e o cimento.

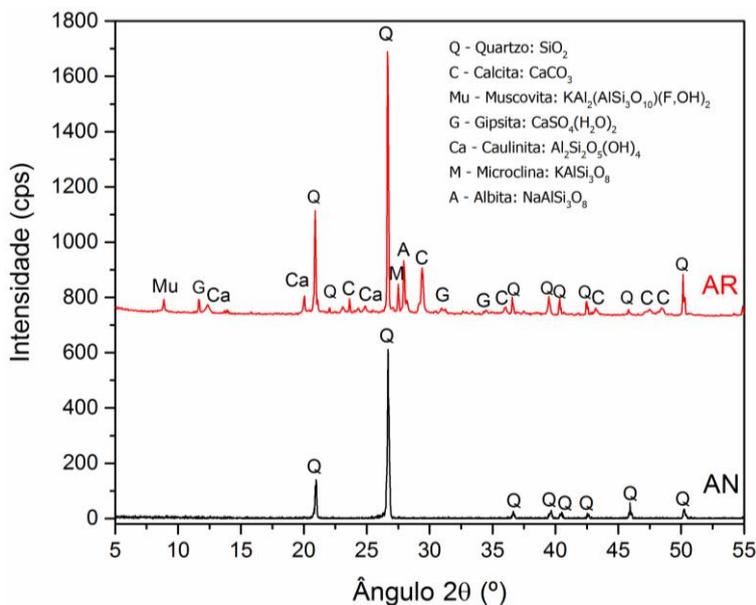


Figura 4.10 – Difratoograma da fração fina (<0,15 mm) dos AN e AR

As presenças majoritárias desses minerais condizem com o observado por outros autores (JIMÉNEZ *et al.*, 2013; RODRIGUES *et al.*, 2013; EVANGELISTA *et al.*, 2015; CONTRERAS *et al.*, 2016; RESTUCCIA *et al.*, 2016) e reforçam os resultados obtidos por Martínez *et al.* (2016), onde os autores notaram que para os três tipos de AR analisados (concreto, cerâmica e misto) a presença de quartzo e calcita foi preponderante.

Outros minerais, como a muscovita, gipsita, caulinita, microclina e albita foram identificados em menor intensidade nos AR. A presença de gipsita (gesso), também observada por Jiménez *et al.* (2013) e Martínez *et al.* (2016), reafirma os resultados obtidos na composição dos AR através do FRX. A origem da muscovita pode estar relacionada com as rochas de granito e componentes de cerâmica vermelha. A microclina e albita são minerais encontrados em feldspatos, que estão presentes em rochas naturais. Já a presença de caulinita deve-se, possivelmente, a presença de componentes de argila, conforme também observado por Ângulo *et al.* (2009).

#### 4.1.2.6 Atividade pozolânica

A atividade pozolânica foi realizada o objetivo de avaliar a pozolanicidade dos finos (<0,15 mm) resultantes de AR de RCD. Na Tabela 4.7, estão dispostos os resultados da resistência à compressão média das argamassas com cimento e com a cal.

Tabela 4.7 – Índice de desempenho das argamassas de cimento e cal com o AR

Argamassas	IAP com o cimento			IAP com a cal		
	fc (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	fc (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
REF	25,59	0,51	1,98	-	-	-
AR	19,65	0,39	2,01	0,67	0,020	3,02

IAP= índice de atividade pozolânica; fc = resistência à compressão média; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; REF = argamassa de referência

A resistência à compressão média obtida pelas argamassas de referência (REF) foi de 25,59 MPa e a argamassa com finos do AR obteve 19,65 MPa. Ressalta-se que as amostras que apresentaram desvio relativo máximo superior a 6% foram desconsideradas no cálculo das resistências médias, assim como recomenda a NBR 7215 (1997). Dessa forma, obteve-se um índice de desempenho com o cimento (IDC) de 76,81%, sendo inferior ao requerido pela NBR 12653 (2015) que é de no mínimo 90%. No entanto, está acima do valor requerido na norma publicada em 2012, que é de 75% e demonstra que os finos do AR apresentam alguma reatividade com o cimento.

As argamassas de cal com o AR apresentaram resistência à compressão média aos 7 dias de 0,67 MPa, sendo significativamente inferior a 6,0 MPa, isto é, aos requisitos da NBR 12653 (2015) para que o material analisado seja considerado como pozolânico com a cal. A argamassa de cal produzida com os finos necessitou de elevada quantidade de água (430 g) para atingir o espalhamento requerido por norma (220-225 mm), sendo esse fator determinante para a diminuição da resistência mecânica.

Dessa maneira, os finos da AR analisados neste trabalho, não podem ser considerados como materiais pozolânicos, corroborando com os resultados de outros autores (LEVY; HELENE, 2004; MIRANDA; SELMO, 2006; JOCHEM, 2012), onde o ganho de resistência observado em alguns casos, pode estar associado ao empacotamento da mistura, por meio do refinamento dos poros (efeito filler). No entanto, são necessários outros estudos a fim de aprimorar a reatividade desses resíduos, como a diminuição do tamanho das partículas objetivando aumentar a área superficial (ROCHA, 2016), e/ou a sua calcinação à elevadas temperaturas (PEDROZO; ROCHA; CHERIAF, 2008).

Nos casos em que o tratamento dos finos não seja viável, é interessante que outras formas de utilização, como a produção de agregados leves (MUELLER; SCHNELL; RÜBNER, 2015), sejam adotadas visando o não descarte dessa fração.

#### 4.1.3 Teor de argamassa aderida aos grãos dos AR

Se consideramos a quantidade de material solúvel em ácido à quantidade de argamassa aderida aos grãos dos AR, pode-se inferir que os AR estudados nesta pesquisa apresentam cerca de 11% de argamassa aderida à superfície dos seus grãos.

Os resultados obtidos são inferiores aos encontrados na literatura (25-65% referente ao tratamento com ácido, segundo Juan e Gutiérrez (2009)), o que é justificável em função de ser um AR misto e não de concreto. Verificou-se ainda, que os grãos que possuem maior quantidade de material solúvel em HCL são os retidos na peneira de 0,3 mm e os finos (<0,15 mm), conforme observa-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultados do ensaio de teor de argamassa dos AR

Frações (mm)	Massa retida (g)	% de argamassa	Quantidade em massa (g)
4,75	0	0	0
2,36	32,2	18,1	5,8
1,18	54,3	15,7	8,5
0,6	75	11,7	8,8
0,3	166,5	7,0	11,7
0,15	119,5	7,1	8,4
<0,15	51,5	21,7	11,2

No geral, a quantidade de argamassa aderida aos grãos aumentam com a diminuição do tamanho do AR, fato também observado por outros autores (ÂNGULO, 2000; JUAN; GUTIÉRREZ, 2009; MARTÍN-MORALES *et al.*, 2011; EVANGELISTA *et al.*, 2015; LE *et al.*, 2016). E à medida que esse teor aumenta, a absorção do AR também aumenta (ULSEN *et al.*, 2013).

Tem-se ainda, sugerido na literatura (JUAN; GUTIÉRRES, 2009), que em função dos sulfatos derivados da argamassa aderida, os AR apresentam elevado teor de sulfato. Sendo assim, o teor de argamassa aderida aos grãos exercem influência negativa sobre as propriedades físicas e mecânicas dos AR e, conseqüentemente, sobre as propriedades das argamassas.

## 4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

### 4.2.1 Consumo de água

A quantidade de água requerida para um espalhamento de 260 mm, foi obtida através do gráfico que relaciona o espalhamento *versus* o consumo de água/materiais secos (Figura 4.11).

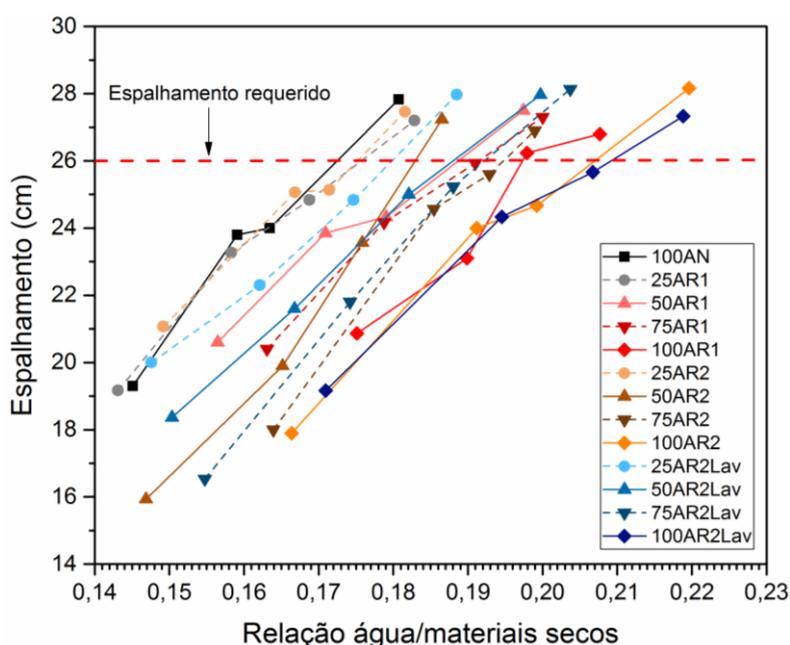


Figura 4.11 – Gráfico do espalhamento versus relação água/materiais secos

Através das curvas apresentadas no gráfico da Figura 4.11, foram obtidas, por meio de regressão linear, as relações água/materiais secos ( $a/ms$ ) de cada composição estudada e, conseqüentemente, a relação água/aglomerante ( $a/a$ ) e relação água/cimento ( $a/c$ ) (Tabela 4.9).

Com os resultados obtidos na Tabela 4.9, identificou-se que, para todas as composições estudadas, a incorporação do AR (AR1, AR2 e AR2Lav), resultou em aumento linear da quantidade de água necessária para as argamassas atingirem a consistência de 260 mm. Logo, a relação  $a/c$  aumentou com o aumento do percentual de substituição do AN pelo AR.

Tabela 4.9 – Consumo de água para atingir o espalhamento requerido

Argamassa	Equação da reta	R <sup>2</sup>	a/ms	a/a	a/c
100AN	$y = 234,75x - 14,32$	0,976	0,172	0,97	1,36
25AR1	$y = 199,30x - 8,92$	0,979	0,175	0,99	1,39
50AR1	$y = 163,51x - 4,70$	0,979	0,188	1,07	1,50
75AR1	$y = 185,24x - 9,49$	0,983	0,192	1,10	1,54
100AR1	$y = 195,93x - 13,50$	0,938	0,202	1,16	1,63
25AR2	$y = 194,85x - 7,91$	0,983	0,174	0,97	1,37
50AR2	$y = 284,80x - 26,36$	0,985	0,184	1,02	1,44
75AR2	$y = 256,86x - 23,83$	0,983	0,194	1,07	1,50
100AR2	$y = 191,72x - 13,53$	0,979	0,206	1,13	1,59
25AR2Lav	$y = 195,28x - 9,07$	0,993	0,180	1,01	1,41
50AR2Lav	$y = 196,78x - 11,15$	0,997	0,189	1,05	1,47
75AR2Lav	$y = 238,82x - 20,11$	0,993	0,193	1,07	1,50
100AR2Lav	$y = 170,45x - 9,59$	0,977	0,209	1,15	1,61

As argamassas produzidas com AR1 apresentaram, com execução da composição com 25% de substituição, maior consumo de água, comparada as outras composições (AR2 e AR2Lav). A maior quantidade de finos presentes na composição dos AR (que são materiais com maior área específica), assim como o maior consumo de AR destas composições, foi determinante para que as argamassas produzidas com AR1 apresentassem maior relação a/c. Esses resultados estão de acordo com os encontrados na literatura (OLIVEIRA; CABRAL, 2011; JOCHEM, 2012; JIMÉNEZ *et al.*, 2013; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; SILVA; BRITO; DHIR, 2016; MUÑOZ-RUIPEREZ *et al.*, 2016; RESTUCCIA *et al.*, 2016; GAYARRE *et al.*, 2017) e mostram que independente da fração que constitui o AR miúdo, isto é, seja misto, de concreto ou cerâmico, a incorporação de AR em argamassas conduz a relações a/c superiores.

Por outro lado, visualmente observou-se que as argamassas com AR1 apresentaram maior plasticidade em comparação com as argamassas com AN e os outros tipos de AR. A presença dos finos que, possivelmente, contém materiais à base argila, contribui positivamente para reologia da argamassa no estado fresco (CORINALDESI, 2012).

Moriconi, Corinaldesi e Antonucci (2003) observaram que pastas de cimento com a incorporação de AR exigiram tensões de escoamento mínima para que a pasta iniciasse o fluxo, o que consequentemente implicou na manutenção da

trabalhabilidade por mais tempo, tendo em vista que o tempo para alcançar o limite da tensão de cisalhamento foi o elevado. Os autores concluíram ainda, que quanto ao comportamento reológico, as pastas com AR poderiam ser consideradas como pseudoplásticas sem histerese. Assim os AR, quando possuem elevadas quantidades de finos de origem argilosa, favorecem a plasticidade das argamassas no estado fresco.

Sabe-se que os revestimentos argamassados precisam manter-se trabalháveis por um período de tempo razoável (LEDESMA *et al.*, 2015) e sua consistência fornece uma avaliação indireta de sua vida exequível (funcional) (SILVA; BRITO; DHIR, 2016). Estes últimos autores comentam ainda, que as argamassas de revestimentos devem ser baseadas, principalmente, em propriedades como aderência e vida funcional e que, devido a diminuição significativa da consistência das argamassas com AR, é importante compensar a água absorvida por estes agregados a fim de manter a vida funcional e o desempenho mecânico satisfatório.

Assim, foi observado que a consistência das argamassas com AR é afetada com o passar do tempo, o que dificulta a sua trabalhabilidade e, por conseguinte, a sua aplicação. Em função da elevada absorção de água destes agregados, foi necessário reamassar as argamassas com água, contribuindo para pulverulência superficial dos revestimentos, e conseqüentemente para o seu desempenho inferior no estado endurecido.

Além disso, as argamassas com AR1, especialmente quando se utilizou percentuais de substituição superiores a 50%, conduziram a revestimentos com textura mais áspera. As AR1, possuem maior quantidade de grãos grossos e com formato irregular e, portanto, justificam a dificuldade de se produzir revestimentos com superfície lisa.

Todavia, as argamassas com os três tipos de AR (especialmente quando se utilizou AR1) foram bem aceitas pelos pedreiros quanto a sua plasticidade, que segundo os mesmos, estas argamassas apresentam mais “liga”, ou seja, são mais plásticas quando comparadas com as argamassas com AN comumente produzidas por estes profissionais.

#### 4.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os valores de densidade de massa aparente e do teor de ar incorporado das argamassas no estado fresco estão dispostos nas Figuras 4.12 e 4.13, respectivamente.

Pela análise de Figura 4.12, percebe-se que as argamassas com AR apresentaram, em comparação as argamassas com AN, menor densidade de massa, o que era esperado devido a menor massa específica dos AR. Segundo a classificação de Carasek (2010), quanto à densidade de massa das argamassas no estado fresco, todas as argamassas analisadas são classificadas como normais, visto que suas densidades de massa foram maiores que 1,40 e menores que 2,30 e, assim, podem ser utilizadas em revestimento.

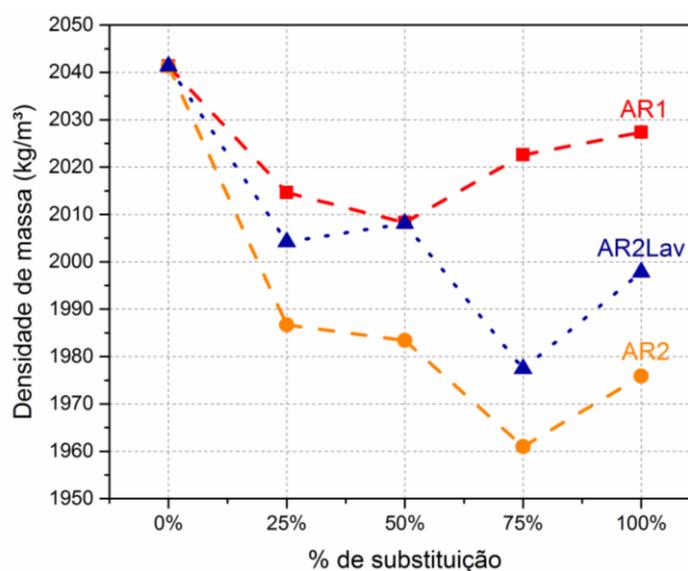


Figura 4.12 – Densidade de massa no estado fresco das argamassas

Para as argamassas com AR1, observa-se que para substituições de até 50%, a densidade de massa sofre redução, o que era esperado. Para percentuais superiores à 50%, isto é, 75% e 100%, a densidade de massa aumenta e atinge valores superiores aos obtidos em percentuais de 25 e 50%. As argamassas com AR2, a redução foi linear para substituições de até 75%, porém com 100% ocorre aumento da densidade de massa, cujo resultado, apesar do aumento, é inferior aos outros percentuais de substituição. Já as argamassas com AR2Lav sofrem as maiores variações, não seguindo uma tendência de redução, como foi observado para as outras composições. Com a substituição de 50%, obteve-se os melhores resultados,

sendo superior aos obtidos para as outras substituições (25, 75 e 100%). Para os percentuais superiores a 50%, os resultados foram semelhantes aos observados para as argamassas com AR2, onde há redução com o percentual de substituição de 75% e aumento com 100%.

O fato da densidade de massa ter aumentado em alguns percentuais de substituição, como é o caso das argamassas 75AR1, 100AR1, 50AR2, 50AR2Lav e 100AR2Lav, bem como as composições com AR1 e AR2Lav apresentarem maiores valores, indicam que estas composições são mais compactas. Esse fenômeno resulta do efeito de micro enchimento dos vazios (empacotamento), que está associado à própria composição granulométrica (maior coeficiente de uniformidade e teor de finos) e a quebra de partículas durante o processo de mistura (menor rigidez dos AR). Essa tendência é melhor observada nas composições com 75AR1 e 100AR1, uma vez que os resultados obtidos no estado anidro em termos de coeficiente de uniformidade e teor de finos, contribuem para maior compactidade destas misturas, justificando o aumento de densidade de massa. Para além desses fatores, o fato das substituições com 100% de AR apresentarem aumento de densidade de massa pode também ser atribuído a maior quantidade de água presente na mistura.

Embora seja esperado que o aumento da incorporação de AR conduza a argamassas com menor densidade de massa no estado fresco, alguns estudos mostraram que ao aumentar o percentual de substituição do AN pelo AR a densidade de massa das argamassas aumentava ligeiramente (CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; FARINHA; BRITO; VEIGA, 2015; CONTRERAS *et al.*, 2016), sendo, portanto, semelhantes aos resultados obtidos nesta pesquisa. Esse aumento de densidade de massa com a incorporação do AR, ocorre também devido os AR apresentarem um número maior de partículas para o mesmo volume de argamassa. Dessa forma, melhoram o empacotamento da mistura e tornam a argamassa mais compacta (CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; CONTRERAS *et al.*, 2016). Por consequência, as partículas menores, especialmente as inferiores a 0,15 mm, preenchem os vazios previamente cheios de água e, como o AR possui maior densidade do que a água, a densidade de massa no estado fresco das argamassas aumenta (FARINHA; BRITO; VEIGA, 2015).

A principal vantagem de uma argamassa mais leve é que, para o mesmo volume de argamassa, a quantidade de massa a ser transportada é menor (LEDESMA

*et al.*, 2015) e, por conseguinte, reduz o esforço do operário e aumenta a produtividade (CARASEK, 2010). Apesar disso, as argamassas que são mais leves possuem maior relação a/c, isto é, absorvem mais água, o que para Ledesma *et al.* (2015) pode ter um efeito negativo sobre a durabilidade de argamassas expostas à ambientes externos, uma vez que a maior absorção de água resultará em um maior volume de poros.

Quanto ao teor de ar incorporado, verificou-se que a partir de 25% de substituição, há uma diminuição do teor de ar incorporado, sendo mais expressivo para as composições com AR1, cuja diminuição foi linear ( $R^2 = 0,908$ ) (Figura 4.13). Esses resultados corroboram com os obtidos nos estudos de Corinaldesi (2012), Araújo (2014) e Ledesma *et al.* (2015) e confirmam a compacidade das argamassas no estado fresco.

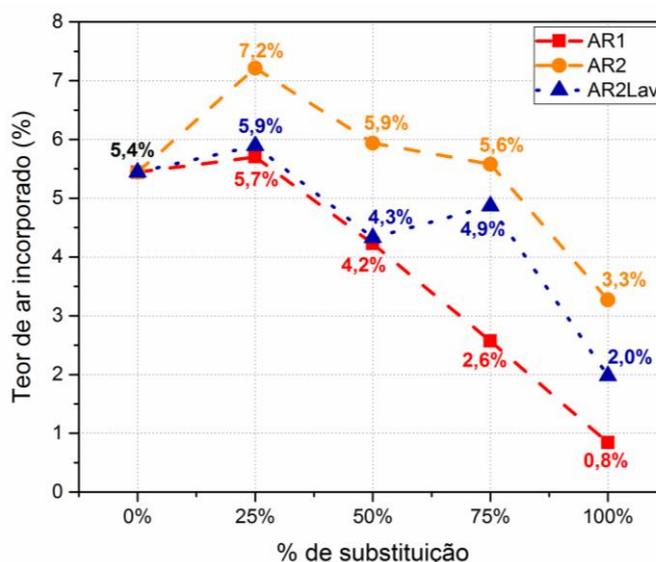


Figura 4.13 – Teor de ar incorporado das argamassas no estado fresco

O melhor desempenho das composições com AR1 deve-se a maior quantidade de finos que, neste caso, possuíam tamanho, cerca de duas vezes, inferior aos dos finos AN (Tabela 4.5). Para Corinaldesi (2012) quando são utilizadas maior quantidade de partículas finas, o número de macroporos diminui devido ao efeito de enchimento e, conseqüentemente o volume de ar incorporado diminui. Associado a esses fatores, a presença de grãos friáveis nos AR aumentam a probabilidade de quebra das partículas durante o processo de mistura e, conseqüentemente, os vazios são preenchidos. Como resultado, o ar incorporado à mistura diminui.

Embora não existam limites especificados quanto ao teor de ar incorporado em argamassas pelas normas brasileiras, sabe-se que o teor de ar incorporado favorece a trabalhabilidade da mistura, todavia, seu aumento excessivo pode prejudicar a resistência mecânica e a aderência (BAÍA; SABBATINI, 2008; JIMÉNEZ *et al.*, 2013) e a durabilidade de argamassas (CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014). Neste caso, é esperado que as argamassas com AR obtenham desempenho satisfatório no estado endurecido, sobretudo as argamassas com AR1.

A Figura 4.14 permite visualizar ainda que há relação entre o coeficiente de uniformidade e o teor de ar incorporado nas argamassas. Com o aumento da continuidade das composições dos agregados, há diminuição linear do teor de ar incorporado nas argamassas, sobretudo para as composições com a AR1 e AR2 (coeficientes de regressão linear de 0,944 e 0,981, respectivamente). Confirmando, portanto, que a compacidade da mistura possui relação direta com a diminuição do teor de ar incorporado em argamassas no estado fresco.

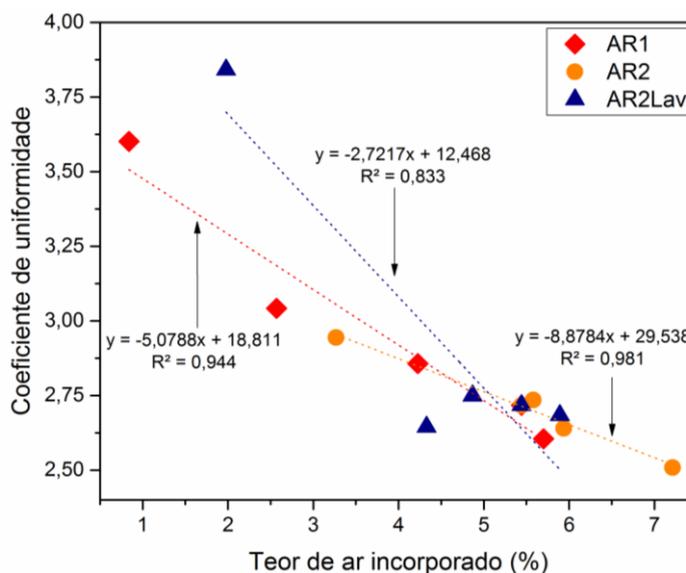


Figura 4.14 – Relação entre o coeficiente de uniformidade das composições dos agregados e o teor de ar incorporado das argamassas

### 4.2.3 Retenção de água

No geral, a incorporação dos AR resultou em argamassas com adequada capacidade de retenção de água (83,5-95%), sendo semelhante aos resultados obtidos para as argamassas com AN (93,3%), o que era esperado tendo em vista os resultados obtidos em outras pesquisas (MIRANDA, 2000; JOCHEM, 2012;

MARTÍNEZ *et al.*, 2013; ARAÚJO, 2014; FARINHA; BRITO; VEIGA, 2015; SILVA; BRITO; DHIR, 2016) e conforme pode-se observar na Figura 4.15.

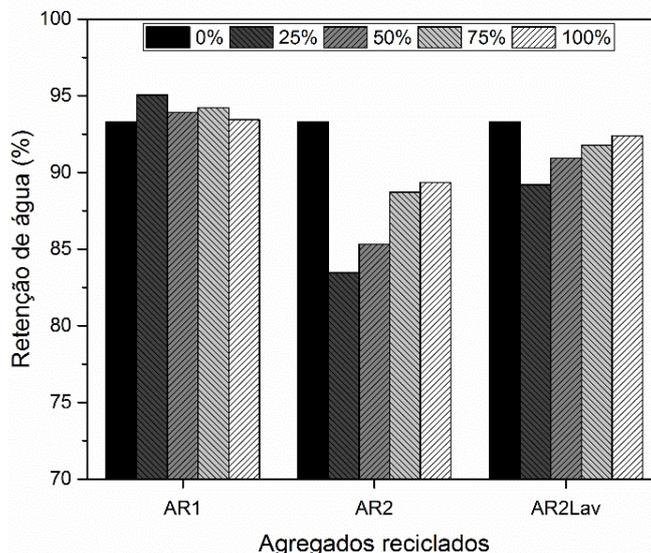


Figura 4.15 – Retenção das argamassas com substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav)

A boa capacidade de retenção de água das argamassas com AR ocorre em função da elevada quantidade de finos, assim como a maior rugosidade e área específica dos AR. Silva, Brito e Dhir (2016) explicam que em função dessas características, é possível que a maior quantidade de água sobre os poros superficiais crie uma força coesiva induzida pela atração eletrostática entre o átomo de hidrogênio (positivo) e o átomo de oxigênio (altamente eletronegativo) em uma molécula de água vizinha. Por conseguinte, quando a argamassa com AR no estado fresco entra em contato com uma superfície que irá absorver água, como por exemplo o tijolo, a perda de água livre provavelmente será inferior à de argamassas contendo AN.

Todavia, a incorporação do AR1 não provocou alterações na capacidade de retenção de água das argamassas com o crescimento de sua substituição. Por outro lado, as argamassas com AR2 e AR2Lab, apesar de apresentarem menor retenção de água quando comparadas com as demais argamassas (referência e com AR1), o aumento do percentual de substituição resultou em aumento gradativo da retenção de água, o que pode ser atribuído ao aumento do coeficiente de uniformidade dos agregados e o maior consumo de aglomerantes dessas misturas. Esses resultados são lógicos, uma vez que ocorre uma redução dos finos e, portanto, confirma-se a premissa de que as partículas finas dos AR proporcionam boa retenção de água das

argamassas (JOCHEM, 2012; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; FARINHA; BRITO; VEIGA, 2015; SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

Esperava-se que as argamassas com AR2Lav apresentassem menor capacidade de retenção quando comparadas as outras argamassas, visto que são as composições que possuem menor quantidade de finos. No entanto, acredita-se que esses resultados se devem a maior continuidade das curvas granulométricas das misturas dos agregados, bem como o maior consumo de cimento e cal (sobretudo para os percentuais de 75 e 100% de substituição), cujos benefícios proporcionados por suas elevadas áreas superficiais, especialmente da cal, são demasiadamente conhecidos na literatura (TRISTÃO, 1995; CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995; CARNEIRO, 1999; GUIMARÃES, 2002). Carneiro (1999) ao estudar a influência da composição granulometria dos agregados em argamassas, concluiu que com o aumento da continuidade das areias, há um aumento no teor de aglomerantes e, conseqüentemente, o aprisionamento da água entre os vazios de areia é maior. Logo, as argamassas apresentavam elevada retenção de água.

As argamassas com os três tipos de AR apresentaram retenção de água superior a 80%, ou seja, são capazes de reter mais de 80% da água utilizada em sua produção, o que é apreciável, uma vez que permite a melhor hidratação do cimento, a manutenção de sua trabalhabilidade por um longo período de tempo e, por conseguinte, resulta em ganhos de resistência mecânica e de aderência (JIMÉNEZ *et al.*, 2013; SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

### **4.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido**

#### **4.3.1 Resistências à compressão e à tração na flexão**

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados aos 28 e 91 dias de cura podem ser observados na Figura 4.16 (a) e (b), respectivamente. Verifica-se que a incorporação dos três tipos de AR, em até 50% de substituição, resultou em diminuição das resistências à compressão das argamassas em ambas as idades, o que era esperado, tendo em vista a maior absorção de água dos AR. Esses resultados corroboram com os obtidos por outros autores (CORINALDESI; MORICONI, 2009; CORINALDESI, 2012; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; LEDESMA *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*,

2015; FERRO *et al.*, 2015; MUÑOZ-RUIPEREZ *et al.*, 2016; MARTÍNEZ *et al.*, 2016; RESTUCCIA *et al.*, 2016).

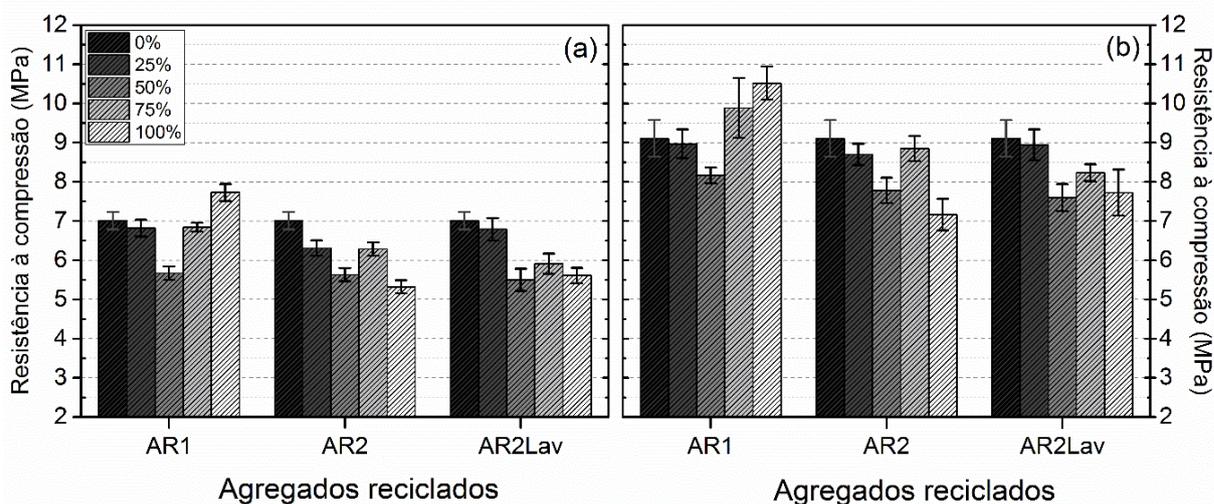


Figura 4.16 – Resistência à compressão das argamassas aos (a) 28 dias e (b) 91 dias com substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav)

Todavia, para percentuais superiores à 50%, houve aumento da resistência à compressão, sobretudo para as argamassas com AR1, concordando também com algumas pesquisas (JIMÉNEZ *et al.*, 2013; ARAÚJO, 2014; CUENCA-MOYANO, 2014; NENO; BRITO; VEIGA, 2014; FARINHA; BRITO; VEIGA, 2015; SAMIEI *et al.*, 2015).

O aumento de resistência, apesar dessas composições possuírem maior consumo de água e menor consumo de cimento, ocorreu devido à presença dos finos do AR que, por possuírem maior área superficial, proporcionam um efeito de micro enchimento, tornando as argamassas mais compactas e, por consequência, mais resistentes. Esses resultados confirmam os observados no estado anidro, onde houve aumento do coeficiente de uniformidade; e no estado fresco, cujas composições com maiores percentuais de AR1 apresentaram aumento da densidade de massa e diminuição do teor de ar incorporado.

A partir da análise dos DRX das argamassas no estado endurecido (Figura 4.17), sugere-se, possivelmente, que o acréscimo de resistência observado para composições com 75 e 100% de AR1, também esteja associado carbonatação e criação de pontos de nucleação. A maior finura do AR promove a formação de pontos de nucleação que, juntamente com a carbonatação e a reidratação dos materiais

cimentícios presentes nos grãos do AR, favorecem a diminuição dos cristais de Portlandita  $[(Ca(OH)_2]$  ao se aumentar a quantidade de AR incorporado, justificando o ganho de resistência dessas argamassas.

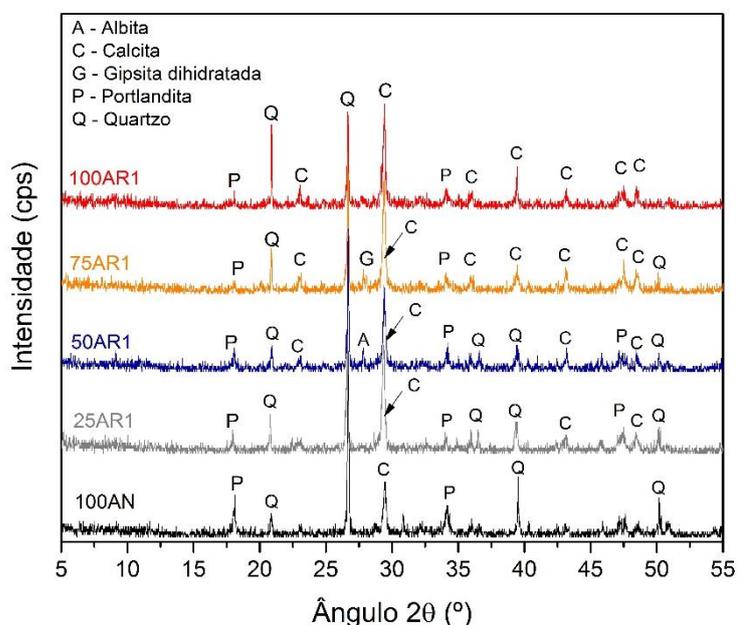


Figura 4.17 – DRX das argamassas com AR1 aos 28 dias de cura.

Outras fases minerais, como quartzo ( $SiO_2$ ), calcita ( $CaCO_3$ ), Albita ( $NaAlSi_3O_8$ ) e Gipsita ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), também foram identificadas e confirmam os resultados obtidos nos DRX dos finos do AR.

Para as argamassas com AR2 e AR2Lav os resultados foram semelhantes, onde ao substituir de 75% e 100% do AN por estes AR, houve ganho e diminuição de resistência à compressão, respectivamente. Entretanto, no geral, as argamassas com AR2Lav, em ambas as idades estudadas (28 e 91 dias), apresentaram melhores resultados, quando comparadas com as composições com AR2 e isto deve-se a fatores como: maior consumo de cimento, melhor coeficiente de uniformidade, maior densidade de massa e menor teor de ar incorporado no estado fresco.

Além dos fatores já citados, outros efeitos podem estar sobrepostos e justificam o aumento das resistências das argamassas estudadas, tais como:

- O AR absorve uma determinada quantidade de água livre durante a mistura e, isto reduz a relação a/c da zona de transição (CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014); existem também as hipóteses de que água em excesso torna-se disponível

para a melhor hidratação do cimento (CABRAL *et al.*, 2010) e a formação de uma quantidade superior de cristais hidratados (OLIVEIRA; CABRAL, 2011). Justificando, portanto, a tendência de que misturas com elevada relação a/c, geralmente, conduzem a um desempenho mecânico semelhante ou superior à das misturas de referência (SILVA; BRITO; DHIR, 2016);

- A maior área superficial do AR, assim como seu formato alongado-achatado com arestas mais definidas melhora a zona de transição entre a matriz e o agregado (CORINALDESI; MORICONII, 2009; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; CABRAL *et al.*, 2010; NENO; BRITO; VEIGA, 2014; SILVA; BRITO; DHIR, 2016);
- Quanto maior for o tamanho do grão, maior será a força do agregado. Isto aumenta evidentemente a resistência mecânica (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2013) das argamassas e podem justificar o desempenho superior das composições com AR1;
- É possível ainda, que a reação química proporcionada pelas partículas não hidratadas de cimento existentes nos AR (BRAGA; BRITO; VEIGA, 2012; SILVA; BRITO; DHIR, 2016) contribuam para o ganho de resistência;

Ao contrário de concretos, a resistência à compressão não é uma propriedade apreciável para argamassas de revestimento, tendo em vista que argamassas com elevada resistência à compressão apresentam elevada rigidez e, com isso, o desempenho dos revestimentos resultantes será inferior, sobretudo quanto ao surgimento de fissuras. Dessa forma, no geral, os revestimentos argamassados com as AR2 e AR2Lav apresentaram melhor desempenho, uma vez que apresentaram menores resistências à compressão em comparação com as composições com AR1.

Neste caso, mais importante para as argamassas de revestimento talvez seja a resistência à tração na flexão que a resistência à compressão. Os resultados da resistência à tração das argamassas são apresentados na Figura 4.18 (a) e (b). Quando as tensões internas do sistema (alvenaria e revestimento) ultrapassam a resistência à tração das argamassas, as fissuras podem surgir nos revestimentos. Dessa maneira, em termos de resistência mecânica, a resistência à tração possui maior influência sobre o desempenho e durabilidade dos revestimentos do que a resistência à compressão.

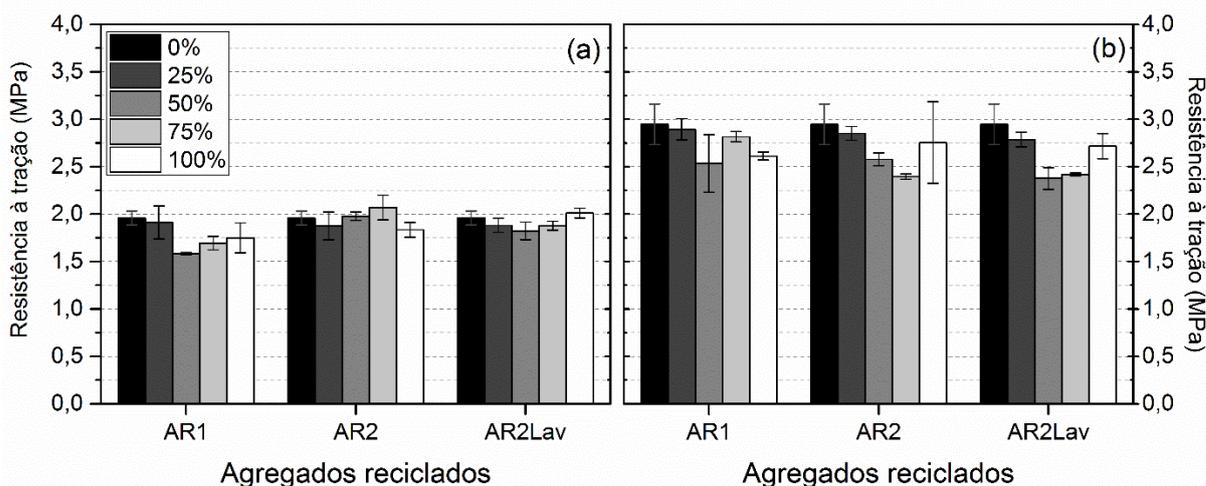


Figura 4.18 – Resistência à compressão das argamassas aos (a) 28 dias e (b) 91 dias com substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav)

As argamassas com os três tipos de AR apresentaram bons resultados e, em alguns casos, a resistência à tração foi superior à das argamassas de referência. Com a AR1, as argamassas seguiram a lógica da resistência à compressão, cujo aumento de resistência foi observado para percentuais superiores a 50%, no entanto, os valores são inferiores as composições com 0% e 25%. Já as argamassas com AR2, em até 75% de substituição, há um ganho linear de resistência. Para substituições de 100%, a resistência à tração diminui novamente. Nenhuma tendência foi observada com a incorporação do AR2Lav, todavia, para a substituição de 100%, essas composições obtiveram melhores resultados, comparada as demais composições com AR (AR1 e AR2).

Aos 91 dias, as composições com maiores percentuais de substituição apresentaram ganho significativo de resistência, apesar de não ter seguido a tendência dos resultados obtidos aos 28 dias de cura. Os bons resultados podem ser explicados pela melhor aderência física entre a pasta e os AR, pela possível reação pozolânica e, sobretudo, pela angularidade das partículas do AR.

#### 4.3.2 Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com AN e com os três tipos de AR, curadas por 28 dias, são apresentados na Figura 4.19, onde constatou-se que as argamassas de referência apresentaram maior módulo de

elasticidade. Já era esperado que as argamassas com AR obtivessem menores módulos de elasticidade devido a maior absorção de água e a menor rigidez desses agregados.

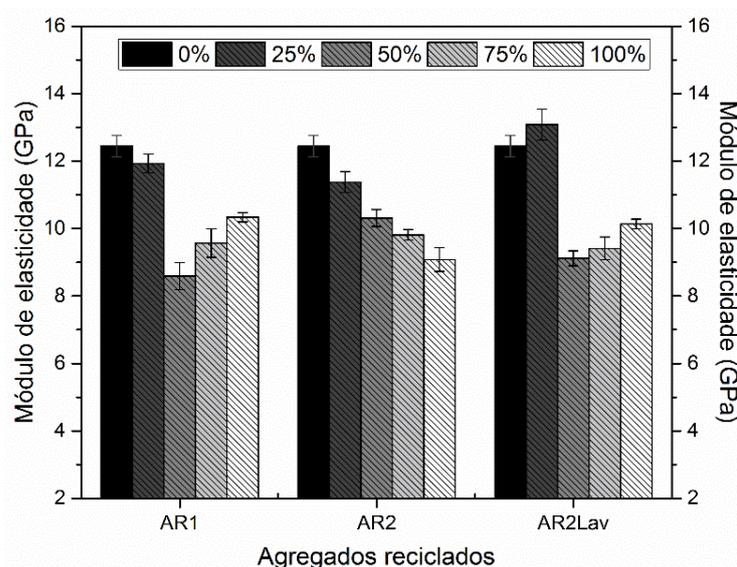


Figura 4.19 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28 dias com substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav)

Verificou-se ainda, que os resultados obtidos para as argamassas com AR1, seguiram a tendência observada para a resistência à compressão, onde em até 50% de substituição, há diminuição dessa propriedade e, para percentuais superiores, há aumento. Esses resultados confirmam a premissa de que os finos dos AR1 ocupam os vazios existentes e, assim, tornam as argamassas mais compactas e, portanto, mais rígidas (maior módulo de elasticidade). Todavia, essa não é uma característica desejável, pois argamassas com maior rigidez são propensas ao surgimento de fissuras. O mesmo foi observado para as argamassas com AR2Lav, com exceção as composições com 25%, cujo resultado obtido foi superior a todas as argamassas estudadas nesta pesquisa. Em contrapartida, as argamassas com AR2 apresentaram diminuição linear do módulo de elasticidade com a incorporação deste tipo de AR.

Uma argamassa de revestimento deve ser capaz de absorver as deformações advindas do substrato e ocasionadas por variações de temperatura, sem que ocorra ruptura ou desprendimento. Módulos de elasticidade baixos, sugerem argamassas com maior capacidade de absorver tais deformações. Logo, as argamassas com AR apresentaram melhores resultados, sobretudo quando se é utilizado AR2 e, dessa maneira, possuem maior capacidade de absorver as deformações. Por outro lado, é

importante ressaltar que o módulo de elasticidade de uma argamassa deve ser, igual ou menor, do que o da parede de alvenaria, mas não tão baixo pois pode causar danos maiores à própria argamassa (SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

### 4.3.3 Absorção por capilaridade

Observa-se na Figura 4.20 que, de modo geral, ao longo do período de realização do ensaio, as argamassas com AR apresentaram menor absorção de água por capilaridade, especialmente para maiores percentuais de substituição das composições com AR1 e AR2.

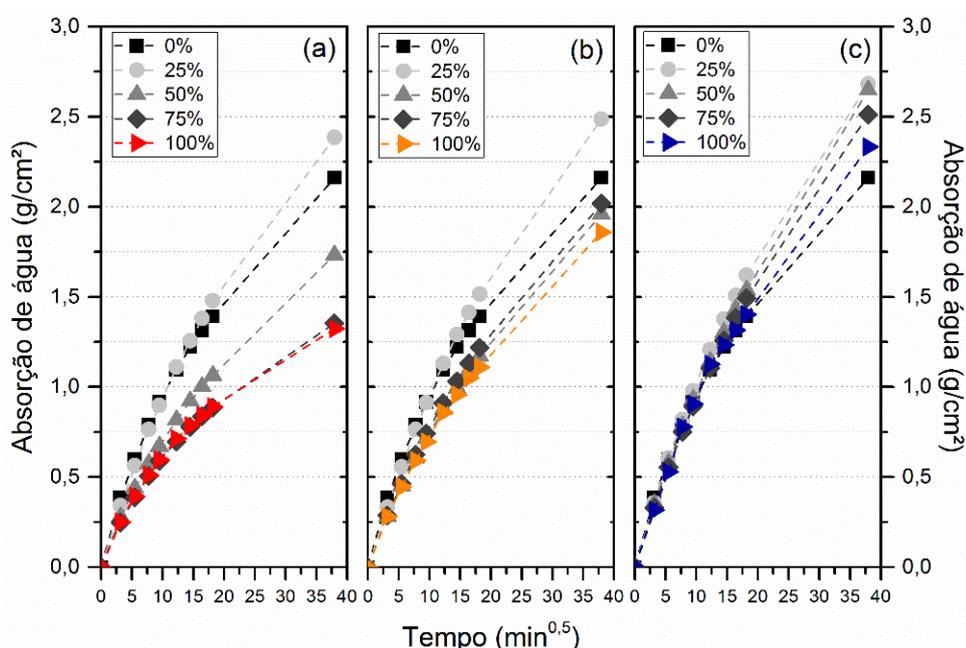


Figura 4.20 – Absorção de água por capilaridade das argamassas com (a) AR1, (b) AR2 e (c) AR2Lav em função do percentual de substituição do AN pelo AR

Contudo, tem-se que o período mais intenso da absorção capilar, ocorre nas primeiras idades e o parâmetro que caracteriza esse comportamento é o coeficiente de capilaridade, cujos resultados são mostrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Coeficientes de capilaridade das argamassas produzidas com os três tipos AR em função do percentual de substituição do AN

Agregados reciclados	Coeficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )				
	0%	25%	50%	75%	100%
AR1	8,50	8,88	6,27	5,45	5,53
AR2	8,50	9,27	6,93	7,27	6,65
AR2Lav	8,50	9,92	9,28	9,00	4,40

Para substituições de até 25%, independentemente do tipo AR utilizado, há aumento do coeficiente de capilaridade, o que era esperado uma vez que o AR possui elevada porosidade. Em percentuais superiores a este, constatou-se que o coeficiente de capilaridade diminui, o que caracteriza, de modo geral, as argamassas com AR como menos permeáveis em comparação a argamassa de referência (com 100% de AN).

As menores taxas de absorção das argamassas com AR1 e AR2 indicam que estas composições, possivelmente, possuirão maior potencialidade para evitar infiltrações resultantes da ascensão capilar da água e, conseqüentemente, serão revestimentos mais duráveis.

Embora esses resultados pareçam ser contraditórios, uma vez que os AR possuem elevada absorção de água, essa tendência pode ser justificada, sobretudo, pelo efeito de micro enchimento proporcionado pela presença dos finos destes agregados. Resultados semelhantes foram obtidos por outros pesquisadores (JOCHEM, 2012; JIMÉNEZ *et al.*, 2013; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; ARAÚJO, 2014; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; NEMO; BRITO; VEIGA, 2014; SAMIEI *et al.*, 2015; SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

Outros fatores podem ter contribuído para esse desempenho, como: i) a forma dos AR, que por ser mais angular e lamelar, dificulta a passagem da água; ii) a cura interna: com o passar do tempo os AR liberam a água de amassamento absorvida durante a mistura e, com isso, contribui para melhor hidratação do cimento – fato também observado por Jochem (2012) e Yildirim, Meyer e Herfellner (2015); e iii) a presença de cimento com alto grau de hidratação que, possivelmente, possui menor porosidade do que a própria matriz (SAMIEI *et al.*, 2015).

Em contrapartida, as argamassas com AR2Lav apresentaram maior taxa de absorção de água capilar, exceto para as argamassas com 100% deste agregado. Isso corre, possivelmente, devido ao maior consumo de aglomerantes e a menor quantidade de finos presentes nestas composições. Essa maior absorção por capilaridade não é apreciável, pois contribui para um desempenho inferior, visto que a utilização de argamassas com maior permeabilidade, prejudica a proteção dos revestimentos contra os agentes agressivos, especialmente quando são expostos à ambientes externos.

#### 4.3.4 Absorção por imersão

Os valores de absorção de água por imersão e porosidade das argamassas estão apresentados na Figura 4.21. Observa-se que as argamassas com AR absorvem maior quantidade de água e, portanto, são mais porosas. Esses resultados corroboram com outras pesquisas (MORICONI; CORINALDESI; ANTONUCCI, 2003; MIRANDA; SELMO, 2006; CORINALDESI, 2009; JOCHEM, 2012; ARAÚJO, 2014; HEINECK, 2012) e confirmam que a porosidade dos AR conduzem a argamassas com maior porosidade no estado endurecido.

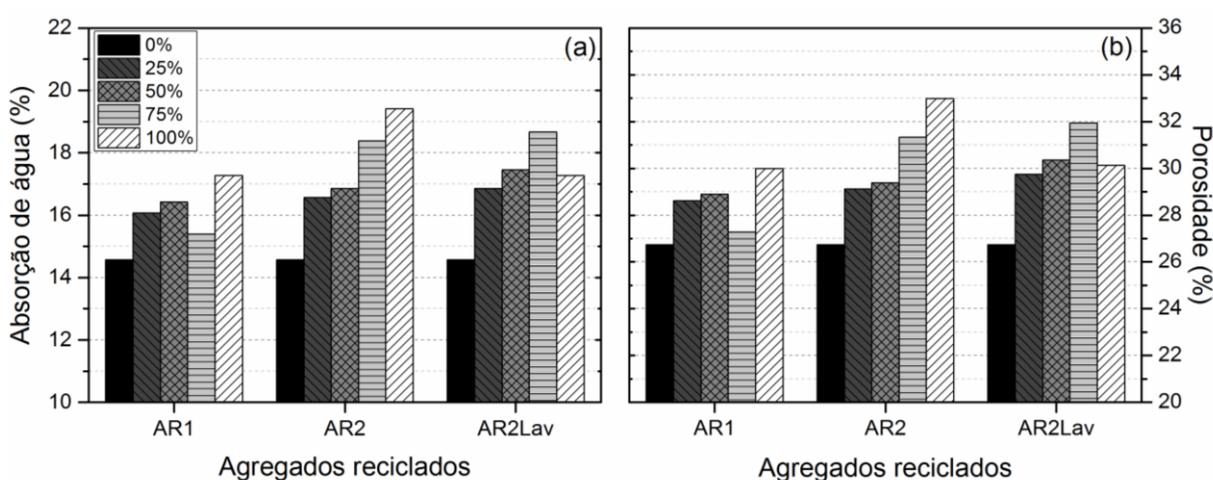


Figura 4.21 – (a) Absorção de água e (b) porosidade das argamassas com substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav)

As argamassas com AR1 apresentaram menor absorção de água e porosidade, apesar de possuírem as maiores relações a/c, quando comparadas as argamassas com AR2 e AR2Lav. O bom desempenho está associado a maior compactidade da argamassa no estado fresco e ao menor teor de ar incorporado, propriedades essas, influenciadas pela presença dos finos e pelo melhor empacotamento dos grãos das composições que possuíam AR1.

Girardi (2016) observou que argamassas com maior densidade no estado fresco apresentarão menor porosidade no estado endurecido. Semelhante ao observado por esta autora, Samiei *et al.* (2015) mostraram que as argamassas mistas (cimento e cal hidráulica) apresentaram uma microestrutura mais densa quando comparada às argamassas de cimento e, com isso, a absorvem menor quantidade de água.

As argamassas com AR2 apresentaram os maiores índices de absorção e porosidade. Esse comportamento pode ser explicado, além da porosidade destes AR, pelo fato do menor empacotamento dos grãos dessas composições, pela menor densidade de massa no estado fresco e pela maior quantidade de ar incorporado. Do mesmo modo ocorre para as argamassas com AR2Lav, porém comparadas as argamassas com AR2, essas composições apresentam maior densidade de massa e menor quantidade de ar incorporado e, portanto, absorvem menor quantidade de água.

Dessa forma, além da porosidade dos AR, foi observado que a densidade de massa no estado fresco reflete na compacidade das argamassas e que possui relação direta com a absorção de água e porosidade das argamassas no estado endurecido. Quanto ao efeito do beneficiamento e lavagem dos AR, constatou-se que, nas condições estudadas, esse processo não influencia a porosidade das argamassas. Dessa forma, a utilização de composições de agregados com distribuição granulométrica contínua e com a presença de finos, contribuiu para a diminuição da porosidade das argamassas.

#### **4.4 Caracterização dos revestimentos**

##### **4.4.1 Resistência de aderência à tração**

Os resultados médios obtidos no ensaio de resistência de aderência das argamassas podem ser observados na Figura 4.22. Nota-se, que a incorporação dos AR, independentemente do tipo utilizado, resultou em argamassas com menor potencial de aderência ao substrato, o que é contrário a maioria das pesquisas encontradas na literatura. Porém, os resultados obtidos estão acima do valor mínimo (0,20 MPa, para parede interna e teto) estabelecido pela NBR 13749 (2013) e compatíveis com outras pesquisas (OLIVEIRA; CABRAL, 2011; JIMÉNEZ *et al.*, 2013; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; LEDESMA *et al.*, 2015; GIRARDI, 2016).

Ressalta-se que as argamassas estudadas por esses autores possuíam percentuais de substituição do AN pelo AR diferentes e relações a/c inferiores ao utilizado neste trabalho, o que justifica, apesar de semelhança dos resultados, as maiores resistências de aderência obtidas, com exceção a pesquisa de Girardi (2016) que obteve uma resistência de aderência de 0,19 MPa.

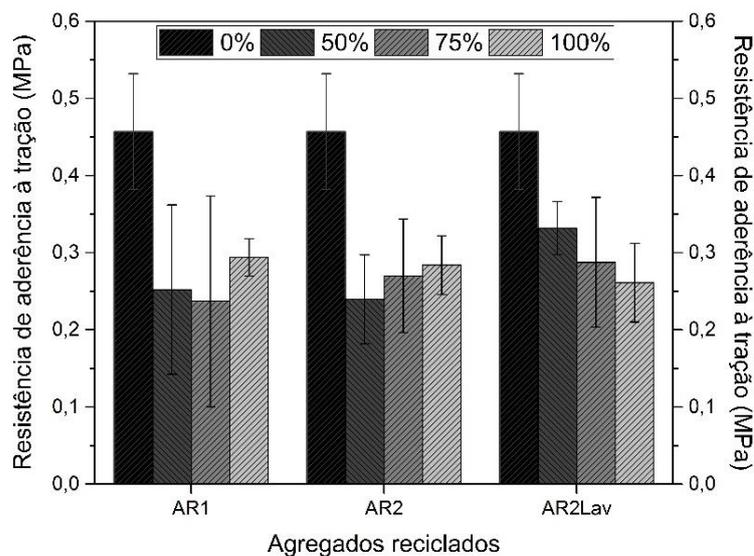


Figura 4.22 – Resistência de aderência à tração das argamassas com 56 dias e com substituição de 0%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav)

É importante salientar que nem sempre elevados valores de resistência aderência significam revestimentos duráveis, uma vez que o aumento da rigidez resulta em altas tensões de cisalhamento, o que pode ocasionar sérios danos aos revestimentos, como o seu descolamento ao longo do tempo (CARASEK, 2012).

No geral, as argamassas com AR2Lav, apesar da redução linear do potencial de aderência com o aumento do percentual de substituição, obtiveram os melhores resultados (especialmente para os percentuais de 50 e 75%) devido, provavelmente, ao maior consumo de cal e, conseqüentemente, aos bons resultados obtidos para a retenção de água destas composições. Esses resultados foram semelhantes aos obtidos por Ledesma *et al.* (2015). Esses autores, utilizando uma relação a/c inferior ao desta pesquisa e apenas cimento como aglomerante, obtiveram com 100% de substituição do AN pelo AR, em torno de 0,30 MPa e chegaram à conclusão de que a máxima proporção de substituição a ser utilizada, considerando os resultados dessa propriedade, é de 75%.

Em função da excelente capacidade de retenção das argamassas no estado fresco, esperava-se que os revestimentos produzidos com AR1 apresentassem melhor desempenho quanto ao potencial de aderência ao substrato. Todavia, acredita-se que a maior absorção de água destes agregados, bem como o fato da AR1 possuir maior quantidade de grãos grossos, prejudicou a trabalhabilidade das

argamassas e, por conseguinte, sua aplicação ao substrato, reduzindo a extensão de aderência (CARASEK, 2010).

Para além desses fatores, provavelmente, o teor de umidade tenha influenciado o desempenho dos revestimentos com AR (Tabela 4.11), visto que segundo Carasek *et al.* (2008), revestimentos com maior teor de umidade tendem a apresentar menor resistência de aderência quando comparados com revestimentos secos. Ainda segundo a autora, esse fato pode ser explicado pelas alterações que ocorrem na microestrutura da argamassa e da interface argamassa/substrato devido ao preenchimento dos poros pela água acrescentada ao sistema.

Para percentuais de substituição total do AN, os resultados seguiram a tendência observada por alguns autores (CORINALDESI; MORICONI, 2009; CORINALDESI, 2012; SILVA; BRITO; DHIR, 2016). Nestes casos, a presença dos finos do AR melhora o comportamento reológico das argamassas e, por conseguinte, a argamassa penetra melhor na superfície do substrato, assegurando um melhor intertravamento físico, isto é, a ligação entre a argamassa e o substrato é melhorada.

Outro fator a destacar, tão importante quanto o valor de resistência de aderência obtido, é o tipo de ruptura dos os corpos de prova resultantes do arrancamento dos revestimentos (CARASEK, 2012), cujos resultados desta pesquisa estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Umidade e forma de ruptura dos corpos de prova dos revestimentos

Traço	Ra (MPa)	CV (%)	Umidade (%)	Forma de ruptura (%)			
				Sub Chap	Chap Arg	Arg	Arg Col
100AN	0,43	16,4	2,61	-	100	-	-
50AR1	0,25	43,5	1,76	-	51,7	48,3	-
75AR1	0,24	57,7	3,27	-	55,8	44,2	-
100AR1	0,30	8,2	3,47	-	1,7	98,3	-
50AR2	0,26	24,0	1,99	-	10,0	90,0	-
75AR2	0,27	27,4	2,09	0,8	76,7	22,5	-
100AR2	0,28	13,4	2,13	-	43,3	56,7	-
50AR2Lav	0,33	10,3	1,81	-	90,0	10,0	-
75AR2Lav	0,29	29,3	2,04	-	29,2	70,8	-
100AR2Lav	0,28	24,5	2,15	-	52,0	48,0	-

A ruptura das argamassas ocorreu basicamente na interface do chapisco/argamassa e na argamassa, para a maioria das composições estudadas. A

argamassa de referência (100AN) apresentou ruptura exclusivamente na interface argamassa/chapisco, o que caracteriza a ruptura como adesiva.

Quanto as argamassas com AR1, observou-se que a ruptura dos corpos de prova ocorreu em maior grau na interface chapisco/argamassa, especialmente para percentuais de até 75% de substituição. Para percentuais superiores, a ruptura passou a ocorrer com maior frequência na argamassa. Porém, cabe ressaltar que essas argamassas apresentaram maior coeficiente de variação, o que é indesejável, pois a incidência de manifestações patológicas não ocorrem na média e sim nos valores mais baixos (CARASEK, 2012).

As argamassas produzidas com AR2, especificamente com percentuais de substituição de 50 e 100% do AN, exibiu, frequentemente, ruptura na argamassa. Com 75% de substituição, a ruptura ocorreu predominantemente na interface chapisco-argamassa. Por outro lado, as argamassas com AR2Lav apresentaram ruptura predominantemente na interface chapisco/argamassa (50 e 100%). E para percentuais de 75%, a ruptura aconteceu na argamassa.

No geral, a ruptura das argamassas ocorreu com maior frequência na interface argamassa/chapisco e indica que a resistência de aderência do revestimento é igual ao valor obtido no ensaio, conforme a NBR 13528 (2010). Por outro lado, Carasek (2010) comenta que quando a ruptura ocorre nas interfaces do sistema, os valores devem ser mais elevados, pois há uma maior probabilidade de ocorrência de futuras manifestações patológicas. Nos demais tipos de ruptura, o valor obtido é inferior a resistência de aderência do revestimento.

#### **4.4.2 Susceptibilidade à fissuração**

Quanto a susceptibilidade à fissuração dos revestimentos estudados, nota-se a partir da análise do gráfico apresentado na Figura 4.23, que as argamassas com 100% de AN não apresentaram fissuras visíveis a olho nu. Em contrapartida, as argamassas com AR apresentaram quantidade significativa de fissuras por metro quadrado de parede revestida, o que era esperado em função da maior porosidade destes agregados.

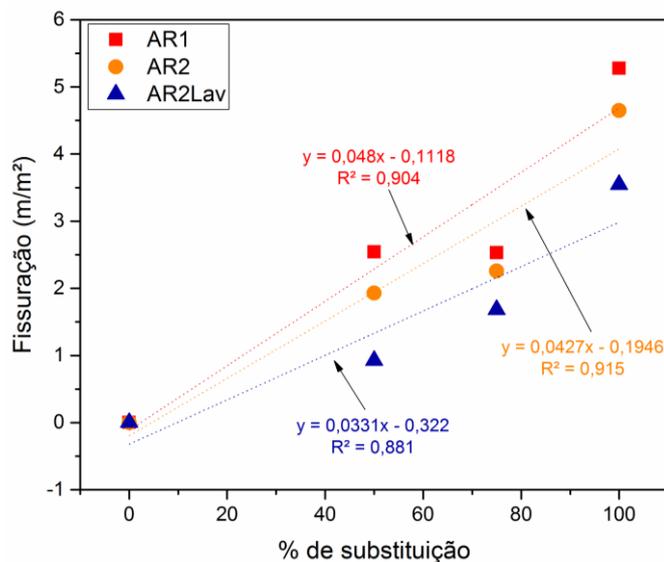


Figura 4.23 – Quantidade de fissuras por metro quadrado de parede revestida dos revestimentos curados a 28 dias e com substituição de 0%, 50%, 75% e 100% do AN pelos AR (AR1, AR2 e AR2Lav)

Durante o endurecimento de uma argamassa ocorrem fenômenos físico-químicos, marcados por variações dimensionais (retração) que se iniciam no estado fresco e se estendem até o estado endurecido (CARNEIRO, 1999; CARASEK, 2010). Há um consenso geral de que ao aumentar o percentual de substituição dos AN por AR, a tensão de retração aumenta (MARTÍNEZ *et al.*, 2013; LEDESMA *et al.*, 2015; SILVA; BRITO; DHIR, 2016; MARTÍNEZ *et al.*, 2016), com isso, as fissuras podem surgir e, portanto, diminuem o desempenho das argamassas aplicadas, especialmente quanto à estanqueidade e a durabilidade dos revestimentos produzidos.

Dessa forma, as argamassas com AR1 apresentaram revestimentos com maior quantidade de fissuras. Os finos, por possuírem maior área específica, demandam maior quantidade de água para realização da mistura e, com isso, cria-se maiores desequilíbrios entre as tensões capilares internas e o ambiente, devido, possivelmente, a diminuição do tamanho dos poros (MIRANDA; SELMO, 2003). Esses resultados refletem as maiores resistências mecânicas e aos maiores módulos de elasticidade dessas composições, confirmando a premissa de que argamassas mais resistentes e rígidas são propensas ao surgimento de fissuras.

Em contrapartida, ao se utilizar AR2 e AR2Lav observou-se uma diminuição da quantidade de fissuras nos revestimentos, sobretudo para as argamassas com AR2Lav, o que é lógico, pois com o beneficiamento e a lavagem do AR, os finos são

retirados e absorção de água diminui. Logo, esses revestimentos apresentam menor fissuração e confirmam os resultados obtidos por diversos autores (MIRANDA, 2000; MIRANDA, 2005; JOCHEM, 2012; RUDNITSKI; NAKANISHI; MOHAMAD, 2014; FARINHA; BRITO; VEIGA, 2015).

Esses resultados reafirmam que a utilização de AR com elevada quantidade de finos não é indicada para a produção de argamassas de revestimento. Apesar das normas brasileiras não estabelecerem limites quanto a quantidade de fissuras em revestimentos, é consenso geral que, quanto maior a quantidade de fissuras em um revestimento, menor será sua durabilidade. Porém, acredita-se que em até percentuais de 50%, é possível utilizar AR, sem que haja fissuração excessiva dos revestimentos, especialmente quando se utiliza esses tipos de agregados sem finos e em condição lavada.

#### 4.5 Viabilidade econômica

Os resultados são apresentados na Tabela 4.12. Constata-se, que independentemente do tipo de AR (seja, AR1, AR2 ou AR2Lav), as argamassas produzidas com 100% de AN, apresentam maior preço para a produção de 1m<sup>3</sup> de argamassa. Em todas as argamassas com AR, o preço diminui linearmente com o aumento do percentual de substituição, fato esse, também observado por Miranda (2000).

Tabela 4.12 – Custo para a produção de 1 m<sup>3</sup> de argamassa

Traços	Preço/m <sup>3</sup>						Total
	Cimento	Cal	AN	AR1	AR2	AR2Lav	
100AN	88,1	53,4	38,2	0,0	0,0	0,0	R\$ 179,67
50AR1	84,5	51,2	18,3	15,4	0,0	0,0	R\$ 169,41
75AR1	84,4	51,1	9,1	23,0	0,0	0,0	R\$ 167,62
100AR1	83,4	50,5	0,0	30,3	0,0	0,0	R\$ 164,21
50AR2	85,8	52,0	18,6	0,0	15,6	0,0	R\$ 172,03
75AR2	84,7	51,3	9,2	0,0	23,1	0,0	R\$ 168,26
100AR2	85,0	51,5	0,0	0,0	30,9	0,0	R\$ 167,45
50AR2Lav	86,5	52,4	18,8	0,0	0,0	17,3	R\$ 175,02
75AR2Lav	85,5	51,8	9,3	0,0	0,0	25,6	R\$ 172,14
100AR2Lav	85,8	52,0	0,0	0,0	0,0	34,3	R\$ 172,06

Comparando as argamassas produzidas com AR, nota-se que as composições com AR1 apresentaram o menor custo de produção, o que se deve ao menor consumo de aglomerantes e, sobretudo, a menor demanda de AN (insumo mais oneroso). O

inverso ocorre para as composições com AR2 e, principalmente, para as composições com AR2Lav. Esse fato é justificado pelo maior consumo de aglomerantes e AN, assim como, pelo menor consumo de AR.

Portanto, presume-se que, para os preços adotados, é viável economicamente a utilização dos três tipos de AR para a produção de argamassas de revestimento, uma vez que essas composições, para todos os percentuais de substituição, obtiveram os menores custos por m<sup>3</sup> de argamassa produzida.

## CAPÍTULO 5

# Considerações finais

### 5.1 Conclusões

Com base nos resultados experimentais realizados neste estudo, as seguintes conclusões relativas ao efeito da incorporação de AR, com diferentes composições granulométricas e lavado, nas propriedades das argamassas e revestimentos podem ser tiradas:

- **Caracterização dos agregados:**

- i. A incorporação do AR, independentemente do tipo (AR1, AR2 ou AR2Lav), resultou em misturas com melhor distribuição granulométrica, sobretudo, quando se utilizou AR1 (AR com finos). Esse comportamento é justificado pelos finos que, por possuírem maior área superficial, preenchem os vazios e, com isso, melhoram o empacotamento dos grãos;
- ii. Os AR quando comparados aos AN apresentaram menor massa específica e massa unitária, além de maior absorção de água, o que confirma os resultados encontrados na literatura. Todavia, com o beneficiamento e a lavagem dos AR, a massa específica aumenta e absorção de água diminui;
- iii. O teor de argamassa aderida as partículas do AR foi em torno de 11%. Constatou-se ainda, que esse teor aumenta com a diminuição do tamanho das partículas e que os finos são uma das frações que possuem o teor mais elevado;

- **Análise da variação das propriedades físicas do AR:**

- i. A partir da análise estatística da variabilidade das propriedades físicas dos AR, presume-se que, no geral, as amostras analisadas se comportam como uma distribuição normal, o que indica que há uma tendência dos resultados obtidos se concentrarem em torno da média. Outro dado importante é que a probabilidade de ocorrer eventos de massa específica entre 2,49-2,55 g/cm<sup>3</sup> varia em torno de 68%, o que sugere, juntamente com os parâmetros

estatísticos de variação amostral, que os AR produzidos pela usina apresentam adequada composição e baixa variação.

- **Caracterização dos finos dos agregados**

- i. Os finos do AR, em comparação aos finos do AN, possuem menor granulometria e maior área superficial, assim como formato mais irregular/angular e superfície porosa com textura rugosa e áspera. A textura AR deve-se a presença de argamassa aderida aos grãos e reafirma os resultados obtidos anteriormente;
- ii. Com a análise de FRX, observou-se que os finos do AN são compostos basicamente de quartzo (>95%), enquanto que os finos do AR possuem maiores teores de óxido de sílica, cálcio, ferro e alumínio. Esses óxidos derivam da presença de rochas naturais, ligantes hidratados e materiais de origem cerâmica;
- iii. Os difratogramas confirmaram os resultados obtidos no FRX, visto que esta análise comprovou a presença de quartzo e calcita como principais fases cristalinas. Outros minerais, em menor intensidade foram encontrados e são originados de rochas e materiais cerâmicos (muscovita, gipsita, caulinita, microclina e albita);
- iv. Os finos do AR apresentaram índice de desempenho, tanto com a cal quanto com o cimento, inferior ao estabelecido por norma e, portanto, não são considerados materiais pozolânicos;

- **Caracterização das argamassas no estado fresco:**

- i. Independentemente do tipo de AR utilizado, sua incorporação conduziu a composições com maiores relações a/c, sobretudo, para as argamassas com AR1. Essa maior quantidade de água é resultado da presença dos finos;
- ii. A densidade de massa no estado fresco foi menor para as argamassas com os AR, o que é atribuído à menor massa específica desses agregados. Todavia, para maiores percentuais de substituição, houve aumento da densidade de massa das argamassas com AR, assim como, diminuição do teor de ar incorporado. As argamassas com AR1, em comparação com as demais

- argamassas com AR, são mais densas e incorporam menor quantidade de ar, o que tem relação direta com o empacotamento dos grãos dos agregados;
- iii. No geral, a incorporação do AR, resultou em argamassas com adequada capacidade de retenção de água, entretanto, as argamassas com AR1 apresentaram os melhores resultados até quando comparadas com a argamassa de referência (100% de AN), o que motivado pela presença dos finos;

- **Caracterização das argamassas no estado endurecido:**

- i. Para percentuais de substituição inferiores a 50%, a introdução de AR provocou diminuição da resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas estudadas. Para percentuais superiores à este, as resistências mecânicas aumentaram. Esse efeito foi mais significativo para as argamassas com AR1 e deve-se a maior compactação dessas misturas que é resultado do melhor empacotamento dos grãos, do aumento de densidade no estado fresco e diminuição do teor de ar incorporado;
- ii. A substituição do AN pelo AR resultou em argamassas com menor módulo de elasticidade. A menor rigidez e maior absorção de água dos AR influenciaram diretamente os resultados. Porém, as argamassas com AR1, a partir de 50% de substituição, apresentaram ganho de rigidez, o que confirma que a presença dos finos tornaram as argamassas mais compactas, resistentes e rígidas;
- iii. Em geral, as argamassas com AR são menos permeáveis e mais porosas, quando comparadas as argamassas com AN. Apesar de parecer contraditório, não necessariamente argamassas com maior porosidade, serão permeáveis. Neste caso, as argamassas com AR possuem maior quantidade de poros, porém, não estão conectados entre si, devido a maior compactação dessas argamassas;
- iv. As argamassas com AR apresentaram menor potencial de aderência ao substrato, porém os resultados estão acima do mínimo estabelecido por norma ( $>0,20$  MPa). As argamassas com AR lavado (AR2Lav) apresentaram melhor desempenho, provavelmente em decorrência do maior consumo de aglomerantes quando comparada com as argamassas que possuíam AR1 e

AR2. Quanto a forma de ruptura dos corpos de prova, observou-se que basicamente ocorreu na interface do chapisco/argamassa e na argamassa, para a maioria das composições estudadas;

- i. Há medida em que o AR foi incorporado, a quantidade de fissuras aumentou, sobretudo para as argamassas com AR1. O pior desempenho era esperado, tendo em vista a presença dos finos. Contudo, o beneficiamento e, especialmente, a lavagem do AR, reduziu significativamente a quantidade de fissuras.

- **Viabilidade econômica:**

Economicamente é possível produzir argamassas com AR, uma vez que ao introduzir estes agregados, há diminuição do custo para produzir 1 m<sup>3</sup> de argamassa.

Embora estudos específicos sejam necessários, a fim de reduzir o surgimento de fissuras, admite-se que é viável tecnicamente e economicamente a utilização de AR para a produção de argamassas de revestimento interno, especialmente quando se dispõe de agregados com adequada composição granulométrica e isentos de finos e contaminantes, como é o caso da AR2Lav. Em ambientes externos, são necessárias investigações mais específicas quanto à durabilidade dos revestimentos frente à ação dos agentes agressivos.

Portanto, o estudo indica que o resíduo, até então considerado como um problema ambiental, não inviabiliza a produção de argamassas de revestimento. Com isso, espera-se que esta pesquisa contribua para difusão da utilização desses materiais pela indústria da construção civil, possibilitando, deste modo, visualizar importantes ganhos, sobretudo, ambientais.

## **5.2 Sugestões para estudos futuros**

Em função do vasto campo de pesquisa que envolve esta temática, sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Estudar uma dosagem ideal visando a redução da fissuração dos revestimentos argamassas com a incorporação de AR;

- Avaliar as propriedades de durabilidade e desempenho de sistemas de vedação vertical interno e externo (SVVIE) de unidades habitacionais, a fim de potencializar o uso dos AR;
- Avaliar a possibilidade da adição de materiais de natureza fibrosa, de modo a minimizar os efeitos da retração e, conseqüentemente, a redução da fissuração.

## Referências bibliográficas

- ABCP. **Manual de revestimentos de argamassa**. 1.ed. São Paulo, 2003. 104p.
- ABNT. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABNT. **NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ABNT. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ABNT. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ABNT. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ABNT. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ABNT. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos, Rio de Janeiro, 2004. 12p.
- ABNT. **NBR 15258**: Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT. **NBR 7200**. Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ABNT. **NBR 7211**: Agregados para concreto- especificações. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT. **NBR 7211**: Agregados para concreto- especificações. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ABNT. **NBR 7218**: Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT. **NBR 8802**: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ABNT. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

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

ABNT. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT. **NM 45**: Agregados – Determinação de massa unitária e do volume de vazios. Norma Mercosur. Rio de Janeiro, 2006.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. ABRELPE, 2014.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. In: GODEMBERG, J. (Coord.). Sustentabilidade. 5 v. São Paulo: Blücher, 2011.

AGRELA, F.; ALAEJOS, P.; JUAN, M. S. Properties of concrete with recycled aggregates. In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y. BRITO, J. (Ed). **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, U.K., p. 304-329, 2013.

AGUIAR, G. **Estudo de argamassas produzidas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção**. 2004. 282p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

AKBARNEZHAD, A.; ONG, K. C. Separation processes to improve the quality of recycled concrete aggregates (RCA). In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y. BRITO, J. (Ed). **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, U.K., p. 246-269, 2013.

ALMEIDA, S. L.; LUZ, A. B. **Manual de agregados para construção civil**. Rio de Janeiro: CETEM, 2009. 228 p.

ALVES, L. A.; EVANGELISTA, A. C. J.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência de agregados miúdos reciclados de argamassas no comportamento mecânico de argamassas de cimento Portland. In: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). **Anais...** Juiz de Fora: ENTAC, 2012.

AMARO, A.; SILVESTRE, C.; FERNANDES, L. **Estatística Descritiva: O segredo dos dados**. 1ª ed. 2009.

ANEPAC. **Agregados**. Dados da ANEPAC, 2010. Disponível em: <<http://anepac.org.br/wp/agregados/>> Acesso em: 15 nov. 2015.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2005. 167p.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M.; CHAVES, A. P.; ALMEIDA, S. L. M.; LIMA, F. M. R. S.; GOMES, P. C. Aperfeiçoamento da reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição: Uso em concretos. In: Seminário: O uso da fração fina da britagem (II SUFFIB), São Paulo, Brasil, 2005, pp. 1–6.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C. KAHN, H. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. In: **Conferência Latino Americana de Construção Sustentável do Ambiente Construído**. São Paulo, 2004.

ÂNGULO, S. C.; ULSEN, C.; JOHN, V. M.; KAHN, H. CINCOTTO, M. A. Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. **Waste management**, v. 29, n. 2, p. 721-730, 2009.

ÂNGULO, S.C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 155p.

ANJOS, M. A. S. **Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: PPGCEM, 2009. 171 p.

ARAÚJO, N. N. **Desempenho de argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da grande Natal-RN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Natal/RN, 2014.

ASSUNÇÃO, L. T.; CARVALHO, G. F.; BARATA, M. S. Avaliação das propriedades das argamassas de revestimento produzidas com resíduos da construção e demolição como agregado. **Exacta**, v. 5, n. 2, p. 223-230, 2007.

BAÍA, L.L.M; SABBATINI, F.H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras. 4 ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2008.

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2012. 374p.

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; MINOCHA, A. K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**. v.68, p. 501-516, out. 2014.

BOURSCHEID, J. A.; SOUZA, R. L. **Resíduos de construção e demolição como material alternativo**. Florianópolis: IF-SC, 2010. 85p.

BRAGA, M.; BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 960-968, 2012.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 8ª ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

CABRAL, A. E. B. MOREIRA, K. M.V. **Manual sobre os resíduos sólidos da construção civil**. Fortaleza: SINDUSCON/CE, 2011.

CABRAL, A. E. B.; SHALCH, V. DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 421-430, 2010.

CALCADO, G. C. S. **Influência da adição de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento Portland**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

CARASEK, H. Avaliação de resultados do ensaio de resistência de aderência de revestimentos de argamassa. **Téchne: Revista de Tecnologia da Construção** (São Paulo), n. 185, p. 64-69, agosto de 2012.

CARASEK, H. **Argamassas**. Capítulo 26. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed. IBRACON, 2010. v.1 & v.2. p. 863-891.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; JUCÁ, T. Estudo de Casos de Deslocamento de Revestimento de Argamassa Aplicado Sobre Estrutura de Concreto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6. Florianópolis, 2005. **Anais...** Santa Catarina, 2005. p. 551-561.

CARASEK, H.; COSTA, E. B. C.; ALVES, A.; MELO, T. Influência da umidade nas propriedades dos revestimentos de argamassa: In: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). **Anais...** Fortaleza: ENTAC, 2008.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 1999. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E. C.; OLIVEIRA, A. M. V.; BRUM, I. A. S.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P.; COSTA, D. B. **Características do entulho e do agregado reciclado**. Capítulo 5. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.

CASSA, J. C. S.; BRUM, I. A. S.; CARNEIRO, A. P.; COSTA, D. B. **Diagnóstico dos setores produtores de resíduos na região metropolitana de Salvador/Bahia**. Capítulo 2. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.

CEOTTO, L. H.; BANDUK, R. C.; NAKAKURA, E. H. **Revestimentos de Argamassas: boas práticas em projeto, execução e avaliação**. Porto Alegre: ANTAC, 2005. 96p.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassas de Revestimento Características, propriedades e métodos de ensaio**. Publicação IPT n. 2378, São Paulo, 1995.

CONAMA. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 17 de jul. 2002. p. 95-96.

CONAMA. Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 17 de ago. 2004, Seção 1, p. 70.

CONAMA. Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 25 maio 2011. p. 123.

CONAMA. Resolução nº 469, de 29 de julho de 2015. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 30 jul. 2015. Seção 1, p. 109-110.

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S. R.; LUCAS, M. C.; LIMA, L. C. N.; CARDOSO, D. S. L.; SILVA, G. A. C.; GREGÓRIO, G. C.; SOUZA, A. E.; SANTOS, A. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594-600, 2016.

CORINALDESI, V. Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 778-784, 2012.

CORINALDESI, V. Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 7, p. 505-510, 2009.

CORINALDESI, V.; GIUGGIOLINI, M.; MORICONI, G. Use of rubble from building demolition in mortars. **Waste management**, v. 22, n. 8, p. 893-899, 2002.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 289-294, 2009.

CUENCA-MOYANO, G. M.; MARTÍN-MORALES, M.; VALVERDE-PALACIOS, I.; VALVERDE-ESPINOSA, I.; ZAMORANO, M. Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 71-79, 2014.

DI MARIA, F.; BIANCONI, F.; MICALE, C.; BAGLIONI, S.; MARIONNI, M. Quality assessment for recycling aggregates from construction and demolition waste: An image-based approach for particle size estimation. **Waste Management**, v. 48, p. 344-352, 2016.

DNPM. **Sumário Mineral 2014 – Areia para Construção**. Brasília: DNPM, 2014. 141 p.

EVANGELISTA, L.; GUEDES, M.; BRITO, J.; FERRO, A. C.; PEREIRA, M. F. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. **Construction and building materials**, v. 86, p. 178-188, 2015.

FARINHA, C.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 194-206, 2015.

FERREIRA, R. L. S.; SILVA, A. W. B.; REIS, A. M.; MEDEIROS, L.; BRUNO, G. B.; ANJOS, M. A. S. Caracterização e estudo comparativo entre dosagens de argamassas para revestimento, utilizando resíduos da construção civil (RCC) oriundos da Grande Natal/RN. In: 58º Congresso Brasileiro do Concreto (CBC). **Anais...** Belo Horizonte: IBRACON, 2016.

FERRO, G. A.; SPOTO, C.; TULLIANI, J. M.; RESTUCCIA, L. Mortar Made of Recycled Sand from C&D. **Procedia Engineering**, v. 109, p. 240-247, 2015.

GAYARRE, F. L.; BOADELLA, Í. L.; PÉREZ, C. L. C.; LÓPEZ, M. S.; CABO, A. D. Influence of the ceramic recycled aggregates in the masonry mortars properties. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 457-461, 2017.

GIRARDI, A. C. C. **Avaliação da substituição total de areia natural por RCD em revestimentos de argamassa**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

GOMES, P. C. C.; SANTOS, M. G. C.; FELIX, S. S.; SANTOS, R. B. Obtenção de argamassas com agregados reciclados produzidos na obra para uso em revestimento. IN: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). **Anais...** Canela: ENTAC, 2010.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

HAWLITSCHKEK, G. **Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2014. 166p.

HAWLITSCHKEK, G.; CARDOSO, F. A.; ULSEN, C.; AMARAL, I.; KAHN, H.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Estudo da influência de areias recicladas a partir de resíduos de construção e demolição (RCD) em argamassas. In: X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. **Anais...** Fortaleza: SBTA, 2013.

HEINECK, S. **Desempenho de argamassas de revestimento com incorporação da fração miúda da britagem de concreto**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2012. 132 p.

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNÁNDEZ, J. M.; BRITO, J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 679-690, 2013.

JOCHEM, L. F. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: características físicas e propriedades da microestrutura**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

JOHN, V. M. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção**. Capítulo 1. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. Reciclagem de

entulho para a produção de materiais de construção. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000. 113p

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. Seminário de reciclagem de resíduos sólidos domiciliares. SEMA/CETESB/GESP, 2000.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 872-877, 2009.

KISKU, N.; JOSHI, H.; ANSARI, M.; PANDA, S. K.; NAYAK, S.; DUTTA, S. C. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 721-740, 2017.

KRÜGER, P.; SOUZA, A. B.; KONOFAL, W. U. Estudo da trabalhabilidade em argamassas e concretos com utilização de RCD. IN: 8º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. **Anais...** Ponta Grossa: AEAPG, 2013. 8p.

KULATUNGA, U.; AMARATUNGA, D.; HAIGH, R. Attitudes and perceptions of construction workforce on construction waste in Sri Lanka. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 17, n. 1, p. 57-72, 2006.

LE, T.; SÉBASTIEN, R.; GWENN, L. S.; ERIC, G. Fresh behavior of mortar based on recycled sand–Influence of moisture condition. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 35-42, 2016.

LEDESMA, E. F.; JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; FERNÁNDEZ, J. M.; BRITO, J. Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production–Part-I: ceramic masonry waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 692-706, 2015.

LEITE, M. B.; PEDROZO, P. H.; OLIARI, G. F.; ALVES, M. F.; DAL MOLIN, D. C. C. Utilização de agregado reciclado de concreto para produção de argamassa. IN: VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). **Anais...** Salvador: ENTAC, 2000.

LELLES, L. C.; SILVA, E.; GRIFFITH, J. J.; MARTINS, S. V. Perfil ambiental qualitativo da extração de areia em cursos d'água. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 439-444, 2005.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo – SP, 2001.

LEVY, S. M. **Materiais na construção civil**. Capítulo 49. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed. IBRACON, 2010. v.2. p. 1629-1657.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Mitos e verdades sobre o efeito pozolânico dos resíduos cerâmicos e argamassas de cimento, produzidos em São Paulo. VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). **Anais...** Salvador: ENTAC, 2004.

LI, J.; YANG, E. Macroscopic and microstructural properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete fines. **Cement and Concrete Composites**, v. 78, p. 33-42, 2017.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 204f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; GOMES, O. F. M. Influence of recycled aggregate on the rheological behavior of cement mortar. **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications, 2014. p. 297-307.

LIMA, R. R. L.; LEITE, M. B. Influence of CDW recycled aggregate on drying shrinkage of mortar. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 2012, 2012.

LLATAS, C. Methods for estimating construction and demolition (C&D) waste. In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y. BRITO, J. (Ed). **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, U.K., p. 25-52, 2013.

LOVATO, P.S. **Verificação dos parâmetros de controle dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos**. EPUSP. São Paulo, 1998.

MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 2, p. 176-188, 2013.

MALTA, J. O.; SILVEIRA, V. S.; GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência da pré-saturação do agregado miúdo reciclado na viscosidade e resistência à compressão de argamassas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 85-98, 2014.

MARTÍNEZ, I.; ETXEBERRIA, M.; PAVÓN, E. DÍAZ, N. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 384-392, 2013.

MARTÍNEZ, P. S.; CORTINA, M. G.; MARTÍNEZ, F. F.; SÁNCHEZ, A. R. A 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**, v. 118, p. 162-169, 2016.

MARTÍN-MORALES, M.; ZAMORANO, M.; RUIZ-MOYANO, A.; VALVERDE-ESPINOSA, I. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. **Construction and building materials**, v. 25, n. 2, p. 742-748, 2011.

MARTÍN-MORALES, M.; ZAMORANO, M.; VALVERDE-PALACIOS, I.; CUENCA-MOYANO, G. M.; SÁNCHEZ-ROLDÁN, Z. Quality control of recycled aggregates (RAs) from construction and demolition waste (CDW). In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y. BRITO, J. (Ed), CAP. 12. **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, U.K., p. 270-298, 2013.

MARTINS, J. G.; ASSUNÇÃO, J. S. **Materiais de construção: argamassas e rebocos**. 3 ed. Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 2008.

MIRANDA, L. F. R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo, 2005.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo, 2000.

MIRANDA, L. F. R. **Usinas de reciclagem de resíduos classe A da construção civil**. Capítulo 12. In: ARAUJO, N. M. C. (Org.). **Construção civil: uma abordagem macro da produção ao uso**. IFPB/SINDUSCON-JP. João Pessoa, 2010. 312p.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. Influência de propriedades mecânicas das argamassas na fissuração de revestimentos com RCD. IN: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Argamassas. **Anais...** São Paulo: ANTAC/POLI-USP, 2003. 11p.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part II– Analysis of the effect of materials finer than 75µm under accelerated aging performance. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 9, p. 625-633, 2006.

MOORE, D. S. **A estatística básica e sua prática**. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MORALES, B. R. S. C. **Avaliação da influência das frações de agregado reciclado nas propriedades das argamassas de revestimento**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2015. 201 p.

MORETTI, J. P.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C.; REZENDE, M. A.; GROMBONI, P. P. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 317-323, 2016.

MORICONI, G.; CORINALDESI, V.; ANTONUCCI, R. Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick. **Materials and Structures**, v. 36, n. 10, p. 702-708, 2003.

MUELLER, A.; SCHNELL, A.; RÜBNER, K. The manufacture of lightweight aggregates from recycled masonry rubble. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 376-387, 2015.

MUÑOZ-RUIPEREZ, C.; RODRÍGUEZ, A.; GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, S.; CALDERÓN, V. Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 139-145, 2016.

NAVRÁTILOVÁ, E.; ROVNANÍKOVÁ, P. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 530-539, 2016.

NENO, C.; BRITO, J.; VEIGA, R. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 168-177, 2014.

OLIVEIRA, M. E. D. **Agregado reciclado de construção e demolição: influencia em propriedade de argamassas para revestimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, 2012.

OLIVEIRA, M. E. D.; CABRAL, A. E. B. Argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de Fortaleza-CE, **Engenharia Civil UM**, n. 41, p. 21-34, 2011.

OLIVEIRA, M. E. D.; MORAES SALES, R. J.; OLIVEIRA, L. A. S.; CABRAL, A. E. B. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Eng Sanit Ambient**, v. 16, n. 3, p. 219-224, 2011.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da Substituição do Agregado Miúdo Natural por Agregado Reciclado Fino em Propriedades de Argamassas e Concretos**. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. 161p.

PEDROZO, R. F.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Estudo da influência de agregados reciclados finos de RCD em substituição do agregado miúdo natural em propriedades de concretos e argamassas. IN: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). **Anais...** Fortaleza: ENTAC, 2008.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 722-729, 2012.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3 ed., Oficina de Textos: São Paulo, 2006.

PINTO, T. P. **Gestão dos resíduos de construção e demolição em áreas urbanas – da Ineficácia a um modelo de gestão sustentável**. Capítulo 3. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189p.

PMN. **Plano municipal de saneamento do município de Natal/RN**: Diagnóstico da situação dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos. PMN/SEHARPE/START. Natal/RN, 2015.

RESTUCCIA, L.; SPOTO, C.; FERRO, GA; TULLIANI, JM. Recycled Mortars with C&D Waste. **Procedia Structural Integrity**, v. 2, p. 2896-2904, 2016.

RINDSKOPF, D.; SHIYKO, M. **Measures of Dispersion, Skewness, and Kurtosis**. In McGaw, B., Baker, E., & Peterson, P. P. (Eds). International Encyclopedia of Education. 3 ed. Ed. Oxford: Elsevier, 2010.

ROCHA, T. S. V. **Resíduos de construção e demolição como substituto parcial do cimento - efeito na durabilidade em materiais cimentícios**. 2016. 189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

RODRIGUES, F.; CARVALHO, M. T.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Physical–chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 438-445, 2013.

RUDNITSKI, J. C.; NAKANISHI, E. Y. B.; MOHAMAD, G. Avaliação de resíduo de construção e demolição de cor cinza e vermelho em argamassa de revestimento. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. **Anais...** CLB-MS 2014, Guimarães/Portugal, 2014. 11p.

SAMIEI, R. R.; DANIOTTI, B.; PELOSATO, R.; DOTELLI, G. Properties of cement–lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 84-94, 2015.

SANTANA, M. J. A.; CARNEIRO, A. P.; SAMPAIO, T. S. **Uso de agregado reciclado em argamassa de revestimento**. Capítulo 28 In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.

SANTIAGO, CC. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007. 202p.

SANTOS, A. C.; AUGUSTO, L.; BECERE, O. H. Soluções inovadoras: água e argamassa. **Revista notícias da construção**. Sinduscon/IPT, São Paulo, 2015.

SCANNELL, S.; LAWRENCE, M.; WALKER, P. Impact of aggregate type on air lime mortar properties. **Energy Procedia**, v. 62, p. 81-90, 2014.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SILVA FILHO, A. F. **Gestão dos resíduos sólidos das construções prediais na cidade de Natal-RN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção: Natal/RN, 2005. 118p.

SILVA, L. R. A. **Utilização do entulho como agregado para a produção de concreto reciclado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Fluminense: Niterói, 2004. 113p.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 400-415, 2016.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 327-339, 2015.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-217, 2014.

SILVA, V. R. G. **Estudos dos parâmetros ambientais, químicos e mineralógicos dos agregados reciclados oriundos da construção civil**, 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

STEFANIDOU, M.; ANASTASIOU, E.; FILIKAS, K. Georgiadis. Recycled sand in lime-based mortars. **Waste management**, v. 34, n. 12, p. 2595-2602, 2014.

TANAKA, G. M. Efeitos do tipo de areia de resíduo de construção e demolição (RCD) nas propriedades de argamassa de cimento e areia. In: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). **Anais...** Canela: ENTAC, 2010.

TOLEDO, G. L.; OVALLE, I. I. **Estatística Básica**. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2012.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE, G.; MASINI, E. A.; ANGULO, S. C. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. **Waste management**, v. 33, n. 3, p. 656-662, 2013.

URBANA. **Coleta de RCD na microrregião de Natal/RN.** Dados obtidos em 27/01/2016 segundo a Diretora de Planejamento e Gestão Ambiental da URBANA, Juliana Maria Duarte Ubarana, 2016.

VÁZQUEZ, E. **Introdução.** In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.

VERÇOZA, E. J. **Materiais de construção.** 4. ed. Porto Alegre: Sagra, 1987. 196 p.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons de cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C.; LIMA, F. B. Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. **Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho**, v. 19, p. 5-18, 2004.

YILDIRIM, S. T.; MEYER, C.; HERFELLNER, S. Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze–thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 288-296, 2015.

ZHAO, Z.; REMOND, S.; DAMIDOT, D.; XU, W. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 179-186, 2015.