

**INFLUÊNCIA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DE  
AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS NO COMPORTAMENTO  
DE ARGAMASSAS DE CIMENTO**

**CÁSSIA APARECIDA RABELO CORRÊA**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO  
CIVIL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DE  
AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS NO COMPORTAMENTO  
DE ARGAMASSAS DE CIMENTO**

**CÁSSIA APARECIDA RABELO CORRÊA**

**ORIENTADOR: Dr. CLÁUDIO HENRIQUE DE ALMEIDA FEITOSA  
PEREIRA**

**CO-ORIENTADOR: Dr. JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.TD-002A/19  
BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

CORRÊA, CÁSSIA APARECIDA RABELO

Influência das frações granulométricas de agregados miúdos no comportamento de argamassas de cimento [Distrito Federal] 2019

xiv, 246p., 210 x 297mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Estruturas e Construção Civil, 2019).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Agregado reciclado

3. Resíduo de construção e demolição

I. ENC/FT/UnB

2. Agregado miúdo

4. Resíduo de concreto

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CORRÊA, C. A. R. (2019) Influência das frações granulométricas de agregados miúdos no comportamento de argamassas de cimento. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-002A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 246 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Cássia Aparecida Rabelo Corrêa.

TÍTULO: Influência das frações granulométricas de agregados miúdos no comportamento de argamassas de cimento.

GRAU: Doutor ANO: 2019

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

---

Cássia Aparecida Rabelo Corrêa

Condomínio Solar de Brasília, quadra 01, conjunto 13, casa 14, Jardim Botânico.

Brasília – DF – Brasil CEP: 71680-349

e-mail: cassiarabelo@hotmail.com

Nome: CORRÊA, Cássia Aparecida Rabelo

Título: Influência das frações granulométricas de agregados miúdos reciclados no comportamento de argamassas de cimento.

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Aprovada em: \_\_\_\_\_

Banca Examinadora

Prof. Dra. Neusa Maria Bezerra Mota

Instituição: UniCEUB

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. André Luís Brasil Cavalcante

Instituição: PPG/UnB

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Marcos Honorato de Oliveira

Instituição: PECC/UnB

Julgamento: \_\_\_\_\_

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha pequena Beatriz.*

*Eu apenas queria que você soubesse  
Que aquela alegria ainda está comigo  
E que a minha ternura não ficou na estrada  
Não ficou no tempo, presa na poeira*

*Eu apenas queria que você soubesse  
Que esta menina hoje é uma mulher  
E que esta mulher é uma menina  
Que colheu seu fruto, flor do seu caminho*

*Eu apenas queria dizer a todo mundo que me gosta  
Que hoje eu me gosto muito mais  
Porque me entendo muito mais também*

*E que a atitude de recomeçar é todo dia toda hora  
É se respeitar na sua força e fé  
E se olhar bem fundo até o dedão do pé*

*Eu apenas queria que você soubesse  
Que essa criança brinca nesta roda  
E não teme o corte de novas feridas  
Pois tem a saúde que aprendeu com a vida*

Gonzaguinha

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e do livre arbítrio.

Aos meus queridos pais, Chico e Merci, por me fazerem entender desde cedo que a educação é o caminho. Aos meus irmãos, Cláudia e Júnior, sempre ao meu lado. Ao meu amor, marido e sempre incentivador, José Augusto. À minha querida filha Beatriz, por existir em nossas vidas. À minha estima família; obrigada pelo apoio e torcida. Vocês são para mim o significado de AMOR VERDADEIRO.

À minha inestimável amiga Rosimary, que, devido a minha ausência necessária, dedicou-se com amor e afeto à minha filha Bia, tornando possível a realização deste trabalho.

À minha querida amiga Vivi, obrigada pela torcida.

Aos Professores Cláudio Pereira e João Henrique Rêgo, por dedicarem parte de seus tempos me orientando nesta pesquisa.

À Professora Valdirene, pelas palavras gentis e pela disponibilidade em compartilhar comigo seus conhecimentos.

Aos Professores Graciela, Lineu e Luciano, pelo incentivo em momentos delicados do doutorado.

À professora Marlova Piva Kulakowski, pelas valiosas contribuições tanto no projeto de tese submetido ao exame de qualificação, quanto na tese submetida à defesa.

À professora Carina Ulsen, pelo apoio e disponibilidade em ajudar no trabalho.

Ao Instituto Federal, Campus Samambaia, em especial ao curso de Edificações, por me permitir utilizar o Laboratório de Materiais de Construção, sem o qual este trabalho não se concretizaria.

Aos meus fieis alunos e estagiários: Luiz (perfeccionismo e disciplina), Raimundo (doçura e raça) e Andressa (questionamento e otimismo).

À colega do IFB, Rejane, por ter me ajudado com as análises estatísticas dos dados do trabalho.

À querida Fernanda, antes colega, e agora amiga, pelo apoio nas horas mais difíceis.

Aos bons préstimos do secretário do PECC, Ricardo.

Aos colegas do PECC, em especial: Thiago, Divino, Henrique, Alexandre, Iarley, Fábio e Jéssica, meus sinceros agradecimentos.

À Fundação de Apoio a Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF) processo:0193002038/2017-17, pelo financiamento de parte dos ensaios da pesquisa.

## RESUMO

### INFLUÊNCIA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS NO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO

**Autor:** Cássia Aparecida Rabelo Corrêa

**Orientador:** Dr. Cláudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira

**Co-orientador:** Dr. João Henrique da Silva Rêgo

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, fevereiro de 2019**

Há tempos a reciclagem de resíduos de construção civil é considerada um ponto importante dentro das questões ambientais. Contudo, é a escassez de areias naturais, em particular nos grandes centros urbanos, que têm levado a indústria da construção civil a se interessar pelo tema. Com relação à aplicabilidade técnica dos agregados miúdos reciclados, pesquisas científicas têm mostrado a viabilidade de seu uso. Porém, normalmente tais pesquisas tentam enquadrá-los à curva granulométrica dos agregados convencionais, algo complexo e ainda objeto de discussão. Sob este contexto, partindo do pressuposto de que as frações granulométricas dos agregados miúdos reciclados apresentam características diferentes, e que, portanto, estas características influenciariam de forma distinta nas propriedades de argamassas e concretos; o trabalho propõe o estudo das frações granulométricas de duas areias recicladas, a AR1 (areia de uma usina de RCD) e a AR2 (areia de RC de corpos de prova de uma usina de concreto). As areias recicladas foram submetidas a ensaios de caracterização física; análises visuais (lupa eletrônica e MEV) e caracterização mineralógica e química (DRX e FRX). Na sequência as propriedades físico-mecânicas de argamassas com teores de substituição de 25% e 100% das frações granulométrica areias AR1 e AR2 foram avaliadas. As argamassas com 100% de areia recicladas foram submetidas às análises microestruturais (MEV/EDS e PIM). Por fim, testou-se a capacidade de aplicação das frações pulverulentas das areias AR1 e AR2 como pozolanas (Granulometria a Laser, Superfície Específica BET, Índice de Atividade Pozolânica, PIM). Os resultados de caracterização revelaram que as areias recicladas são formadas por dois grupos com comportamentos e características com tendências distintas. As análises de FRX confirmaram que as “frações finas” da areia AR1 são quimicamente semelhantes a areia de referência (areia do IPT), o que representa um avanço quanto à possibilidade de uso destas frações específicas na produção de materiais cimentícios. Os ensaios microestruturais revelaram que as argamassas com 100% de areia AR1 são semelhantes às argamassas com 100% de areia do IPT. Com relação às frações pulverulentas, apesar de não serem classificadas como pozolanas, constatou-se melhoras de mais de 70% nos IAP, quando as mesmas foram incorporadas às misturas com finuras e superfície específica adequadas. Os resultados de PIM mostraram que a areia AR1 e sua fração pulverulenta são capazes de refinar poros das argamassas. Por fim, o estudo mostrou que há diferenças nos comportamentos físico-mecânicos das argamassas recicladas, conforme a fração granulométrica é substituída, aumentando a possibilidade de aplicação dos agregados miúdos em *designs* de misturas de concretos e argamassas.

**Palavras-chave:** agregado miúdo reciclado, RCD, RC, argamassas, pozolanas, DRX, FRX, MEV/EDS, PIM.



## **ABSTRACT**

### **INFLUENCY OF THE GRANULOMETRIC FRACTIONS OF SMALL RECYCLED AGGREGATES ON THE BEHAVIOUR OF CEMENT MORTAR.**

**Author: Cássia Aparecida Rabelo Corrêa**

**Advisor: Dr. Cláudio Henrique de Almeida Feitosa**

**Co-advisor: Dr. João Henrique da Silva Rêgo**

**Brasilia, february 2019**

Recycling of construction waste has long been considered an important point in environmental issues. However, it is the scarcity of natural sands, particularly in large urban centers, that have led the construction industry to become interested in the subject. Regarding the technical applicability of recycled small aggregates, scientific researchers have shown the viability of their use. However, these surveys usually try to fit them into the granulometric curve of the conventional aggregates, something complex and still under discussion. Under this context, based on the assumption that the granulometric fractions of the recycled kids aggregates present different characteristics, and that, therefore, these characteristics would have a distinct influence on the mortar and concrete properties; the work proposes the study of the granulometric fractions of two recycled sands, AR1 (sand from an RCD plant) and AR2 (RC sand from test specimens of a concrete plant). The recycled sands were submitted to physical characterization tests; visual analysis (electronic magnifier and MEV) and mineralogical and chemical characterization (XRD and FRX). Following the physical-mechanical properties of mortars with substitution levels of 25% and 100% of granulometric fractions sands AR1 and AR2 were evaluated. The mortars with 100% recycled sand AR1 and AR2 were subjected to microstructural analysis using Scanning Electron microscope and mercury intrusion porosimetry. Finally, the reactivity of the pulverulent fractions were evaluated through the Performance Index test and its porous structure by the technique of mercury intrusion porosimetry. These studies have shown that recycled sands are composed of two groups with different behavior and characteristics. FRX analyses confirmed that the “fine fractions” of sand AR1 are chemically similar to the reference sand (IPT sand) which represents an advance on the possibilities of application of these specific fractions in the production of cement materials. The microstructural tests revealed that mortars with 100% sand AR1 are similar to mortars with 100% sand of IPT. In relation to the powdery fractions, they were not classified as pozzolans, however, it was possible to observe improvements of more than 70% in the IPA, when they were incorporated into the mixtures with suitable fineness and specific surface area. The results of PIM showed that sand AR1 and its powdery fraction are capable of refining pores of mortars. Finally, the study showed that there are differences in the physical-mechanical behavior of recycled mortars, as the granulometric fraction is replaced, thus increasing the possibilities of applying recycled small aggregates to concrete mixtures and mortar designs.

**Keywords:** recycled sands, granulometric fractions, recycled mortars, physical-mechanical, microstructural properties.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....  | 3         |
| 1.2 OBJETIVOS.....  | 5         |
| 1.3 ESTRUTURA DA TESE.....  | 6         |
| <b>2-REVISÃO DE LITERATURA.....</b>   | <b>7</b>  |
| 2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE NORMATIZAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS.....  | 7         |
| 2.1.1 Normatização.....   | 7         |
| 2.1.2 A composição dos resíduos de construção e sua influência sobre a heterogeneidade dos agregados reciclados.....                      | 11        |
| 2.2 PASTA DE CIMENTO.....   | 13        |
| 2.2.1 O teor de pasta de cimento nos agregados reciclados.....  | 13        |
| 2.2.2 A microestrutura dos materiais cimentícios com presença da pasta de cimento endurecida.....   | 14        |
| 2.3 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS.....   | 19        |
| 2.3.1 Absorção de Água.....   | 19        |
| 2.3.2 Massa específica e Massa Unitária.....  | 21        |
| 2.3.3 Forma e Granulometria.....  | 24        |
| 2.3.4 Impurezas e Contaminantes.....  | 26        |
| 2.4 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE MISTURAS CIMENTÍCIAS COM AGREGADOS RECICLADOS.....   | 29        |
| 2.4.1 Trabalhabilidade.....   | 29        |
| 2.4.2 Resistência Mecânica.....   | 31        |
| 2.4.3 Massa Específica e Absorção de Água por Imersão.....  | 34        |
| 2.4.4 Porosidade.....   | 36        |
| 2.5 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES.....  | 38        |
| 2.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICAS E MIROESTRUTURAS.....   | 41        |
| 2.6.1 Difração de Raios-X (DRX) e Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX).....  | 41        |
| 2.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS.....  | 46        |
| 2.3.3 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).....  | 51        |
| 2.3.4 Granulometria a Laser e Superfície Específica BET.....  | 55        |
| 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DE LITERATURA.....  | 59        |
| <b>3-PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>   | <b>61</b> |
| 3.1 Parte 1: CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS RECICLADAS.....  | 64        |
| 3.1.1 1º Etapa: Da coleta à Redução dos Materiais.....  | 64        |
| 3.1.2 2º Etapa: Ensaios de Cumprimento dos Requisitos para Agregado Reciclado Destinado ao Preparo de Concreto sem Função Estrutural..... | 69        |
| 3.1.3 3º Etapa: Ensaios de Caracterização Física das Areias.....  | 71        |
| 3.1.4 4º Etapa: Análises Mineralógicas e Químicas das Areias.....   | 72        |
| 3.2 PARTE 2: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DAS ARGAMASSAS RECICLADAS.....  | 74        |
| 3.3 PARTE 3: ANÁLISES MICROESTRUTURAS DAS ARGAMASSAS RECICLADAS.....  | 81        |
| 3.3.1 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) COM (EDS).....  | 82        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.3.2 Caracterização da estrutura porosa por Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).....  | 86         |
| 3.4 PARTE 4: ANÁLISE DA PAZOLANICIDADE DAS FRAÇÕES PULVERULENTAS.....  | 87         |
| 3.4.1 1º Etapa: Caracterização das Frações pulverulentas FP1 e FP2.....  | 87         |
| 3.4.2 2º Etapa: Ensaio para Cumprimento dos Requisitos para Materiais Pozolânicos.....   | 88         |
| 3.4.3 3º Etapa: Caracterização das Estruturas Porosas das Argamassas Recicladas.....   | 91         |
| 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS .....  | 92         |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>   | <b>94</b>  |
| 4.1 PARTE 1: CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS RECICLADAS .....  | 94         |
| 4.1.1 2º Etapa: Ensaio de Cumprimento dos Requisitos para Agregado Reciclado Destinado ao Preparo de Concreto sem Função Estrutural (ABNT NRB 15116:2004)..... | 94         |
| 4.1.2 3º Etapa: Ensaio de Caracterização Física das Areias.....  | 99         |
| 4.1.3 4º Etapa: Análises Químicas e Mineralógicas das Areias.....  | 119        |
| 4.1.4 Considerações sobre a Parte 1 do Trabalho.....   | 129        |
| 4.2 PARTE 2: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE ARGAMASSAS RECICLADAS.....  | 131        |
| 4.2.1 Análises das Propriedades Mecânicas das Argamassas Recicladas.....   | 131        |
| 4.2.2 Análises das Propriedades Físicas das Argamassas Recicladas.....   | 142        |
| 4.2.3 Considerações sobre a Parte 2 do Trabalho.....   | 147        |
| 4.3 PARTE 3: ANÁLISES MICROESTRUTURAIS DAS ARGAMASSAS RECICLADAS.....  | 149        |
| 4.3.1 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com (EDS).....   | 149        |
| 4.3.2 Análise da estrutura porosa por Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).....   | 161        |
| 4.3.3 Considerações sobre a Parte 3 do Trabalho.....   | 167        |
| 4.4 PARTE 4: ANÁLISE DA POZOLANICIDADE DAS FRAÇÕES PULVERULENTAS.....  | 169        |
| 4.4.1 1ª Etapa: Caracterização das frações pulverulentas FP1 e FP2.....  | 169        |
| 4.4.2 2ª Etapa: Ensaio para Cumprimento dos Requisitos para Materiais Pozolânicos.....   | 175        |
| 4.4.3 3ª Etapa: Caracterização da Estrutura Porosa das Argamassas Recicladas...  | 179        |
| 4.4.4 Considerações sobre a Parte 4 do Trabalho.....   | 184        |
| <b>5 CONCLUSÕES.....</b>   | <b>185</b> |
| <b>6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b>   | <b>188</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>189</b> |
| <b>APÊNDICE A: ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AREIAS.</b>  | <b>201</b> |
| <b>APÊNDICE B: DIFRATOGRAMAS DAS AREIAS.....</b>   | <b>218</b> |
| <b>APÊNDICE C: ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS.....</b>  | <b>221</b> |
| <b>APÊNDICE D: MASSAS INTERMEDIÁRIAS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ARGAMASSAS.....</b>  | <b>223</b> |
| <b>APÊNDICE E: CURVAS GRANULOMÉTRICAS E RELATÓRIOS DE BET.....</b>   | <b>232</b> |
| <b>APÊNDICE F: BANCO DE IMAGENS.....</b>   | <b>243</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 2.1  | Ilustração de um grão de agregado reciclado composto pela antiga e pela nova zona de transição.....   | 16 |
| Figura 2.2  | Imagem do MEV no poro do agregado graúdo reciclado (a), imagem do MEV na superfície do agregado (b), EDS do ponto 1 (c), EDS do ponto 2 (d). (KONG <i>et al.</i> ; 2010) .....  | 18 |
| Figura 2.3  | Correlação entre a absorção e a densidade saturada superfície seca de agregados reciclados (AGRELA <i>et al.</i> , 2011) .....  | 24 |
| Figura 2.4  | Padrões DRX em produtos de separação magnética de agregados miúdos reciclados. (ULSEN 2010).....  | 42 |
| Figura 2.5  | Imagens do MEV de partículas de areia de RC: (a) partícula de 125µm, com cristal de CH; (b) partícula de 125µm, grão de forma irregular e com partículas menores aderidas; (c) partícula de 1mm, da esquerda para direita vê-se a pasta de cimento aderida, ZT na interface e fase mineral. (EVANGELISTA <i>et al.</i> , 2015)..... | 48 |
| Figura 2.6  | Superfície da areia coberta com cinza volante, mostrando o consumo do CH e a formação de novos produtos(KONG <i>et al.</i> , 2010).....   | 49 |
| Figura 2.7  | Microestrutura superficial da antiga ZT coberta com escória (KONG <i>et al.</i> , 2010).....  | 50 |
| Figura 2.8  | Microestrutura das novas e antigas ZT dos concretos com agregado reciclado: sem adição de nanopartículas (a), com adição de nanocalcário (b), com adição de nanosílica (c) (LI <i>et al.</i> , 2017).....   | 51 |
| Figura 2.9  | Porosimetria por intrusão de mercúrio de areias monogranulares: (a) incremental, (b) acumulativa (RATO, 2006).....  | 53 |
| Figura 2.10 | Distribuição granulométrica do cimento CCA e RCV (GUILLANTE <i>et al.</i> , 2017) .....   | 58 |
| Figura 3.1  | Organograma com o Programa Experimental.....  | 63 |
| Figura 3.2  | Imagens da usina: (a) pátio de estocagem de resíduos triados; (b) esteira condutora dos RCDs e (c) aspecto visual após a primeira britagem.....   | 65 |
| Figura 3.3  | (a) Imagem do britador de mandíbula, escala laboratorial; (b) corpos de prova para britagem; (c) material após a primeira britagem.....   | 67 |
| Figura 3.4  | Moinho de esferas, (b) detalhe de uma das panelas e das esferas de ágata.....   | 72 |
| Figura 3.5  | Difratograma do cimento CII-F-32.....   | 77 |
| Figura 3.6  | Curva granulométrica do cimento CII-F.....  | 77 |
| Figura 3.7  | Preparação das amostras para o MEV: (a) corpos de prova de argamassa, (b) polimento de uma amostra após embutimento com resina epóxi, (c) amostras prontas para análise.....  | 83 |
| Figura 3.8  | Mapa da região da zona de transição, com o perfil representado pelos pontos de 1 a 5.....   | 84 |
| Figura 3.9  | Amostras do carrossel com as frações das areias no metalizador, (b, c) imagens do MEV.....  | 86 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figura 3.10 | (a) Imagem do moinho de panelas, (b) detalhe das partes da panela.....   | 89  |
| Figura 4.1  | Massa Unitária das condições estudadas das areias AN, AR1 e AR2.....   | 101 |
| Figura 4.2  | Condições estudadas das areias AN, AR1 e AR2: (a) Absorção de Água, (b) Massa Específica.....  | 102 |
| Figura 4.3  | Massa específica versus absorção de água: (a) condições de estudo da areia AR1, (b) condições de estudo da areia AR2, (c) dados coletados na literatura.....   | 105 |
| Figura 4.4  | Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica, das frações granulométrica da areia AN: (a) grossa e (b) média fina.....   | 110 |
| Figura 4.5  | Imagens do MEV de alguns grãos da fração granulométrica fina da areia AN: (a) imagem geral dos grãos, (b) superfície de um grão.....   | 111 |
| Figura 4.6  | Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica na areia primária AR1.....  | 111 |
| Figura 4.7  | Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica das frações granulométrica da areia AR1: grossa (a) e média grossa (b).....   | 112 |
| Figura 4.8  | Imagens do MEV da areia AR1: imagem geral de um grão (a) e superfície do grão (b), da fração grossa; imagem geral de um grão(c) e superfície do grão (d) da fração média grossa.....                   | 112 |
| Figura 4.9  | Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica, nas frações granulométrica da areia AR1: média fina (a) e fina (b).....  | 113 |
| Figura 4.10 | Imagens do MEV da areia AR1: imagem geral de um grão (a) e superfície do grão (b), da fração média fina; imagem geral de um grão(c) e superfície do grão (d) da fração fina.....                       | 114 |
| Figura 4.11 | Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica, nas frações granulométrica da areia AR2: grossa (a), média grossa (b), média fina (c) e fina (d).....  | 115 |
| Figura 4.12 | Imagens do MEV da areia AR2: imagem geral de um grão (a) e superfície do grão (b), da fração grossa; imagem geral de um grão(c) e superfície do grão (d) da fração média grossa.....                   | 115 |
| Figura 4.13 | Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica, nas frações granulométrica da areia AR2: média fina (a) e fina (b).....  | 116 |
| Figura 4.14 | Imagens do MEV da areia AR2: imagem geral de um grão (a) e superfície do grão (b), da fração média fina; imagem geral de um grão(c) e superfície do grão (d) da fração fina.....                       | 117 |
| Figura 4.15 | Teores em porcentagem da soma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ das três areias (a) e Teores em porcentagem de $\text{CaO} + \text{MgO}$ das areias AR1 e AR2 (b)..... | 121 |
| Figura 4.16 | Análise qualitativa das principais fases cristalinas da areia AN (fases cristalinas versus intensidade dos picos) .....  | 124 |
| Figura 4.17 | Análise qualitativa das principais fases cristalinas da areia AR1 (fases cristalinas versus intensidade dos picos) .....   | 124 |
| Figura 4.18 | Análise qualitativa das principais fases cristalinas da areia AR2 (fases cristalinas versus intensidade dos picos) .....   | 125 |
| Figura 4.19 | Evolução do ganho de resistência à compressão das três areias: fração grossa (a), fração média grossa (c).....   | 133 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figura 4.20 | Evolução do ganho de resistência à compressão das argamassas: fração média fina (a), fração fina (c), areia composta 25% (e).....  | 135 |
| Figura 4.21 | Evolução do ganho de resistência à compressão das argamassas da areia composta.....  | 137 |
| Figura 4.22 | Resistência à compressão das argamassas padrão e recicladas .....  | 138 |
| Figura 4.23 | Taxas de absorção de água por imersão das argamassas padrão e recicladas.....  | 143 |
| Figura 4.24 | Taxas de índices de vazios das argamassas padrão e recicladas....  | 143 |
| Figura 4.25 | Valores de massa específica seca das argamassas padrão e recicladas.....   | 143 |
| Figura 4.26 | Imagens do MEV da amostra da argamassa ARG <sub>AN</sub> : (a) vista mais ampla da amostra, (b) aproximação da região onde foi realizado o perfil das fases, (c) vista mais próxima da região de análise.....                        | 150 |
| Figura 4.27 | Imagem do MEV (EDS) da amostra de argamassa ARG <sub>AN</sub> : perfil das fases zona de transição e fase mineral (agregado).....  | 151 |
| Figura 4.28 | Imagens do MEV da amostra da argamassa ARG <sub>AR1AC</sub> : (a) vista mais ampla da amostra, (b) aproximação da região onde foi realizado o perfil das fases, (c) vista mais próxima da região de análise.....                     | 153 |
| Figura 4.29 | Imagem do MEV (EDS) da amostra da argamassa ARG <sub>AR1AC</sub> : perfil das fases zona de transição e fase mineral (agregado).....   | 154 |
| Figura 4.30 | Imagens do MEV da amostra da argamassa ARG <sub>AR2AC</sub> : (a) vista mais ampla da amostra, (b) aproximação do grão de areia reciclada composta por dois minerais e a ZT antiga, (c) vista mais próxima da região de análise..... | 156 |
| Figura 4.31 | Imagens do MEV (EDS) da amostra da argamassa ARG <sub>AR2AC</sub> : perfil detalhado das fases: agregado (mineral, antiga zona de transição) e a nova zona de transição.....   | 157 |
| Figura 4.32 | Amostras das argamassas ARG <sub>AN</sub> , ARG <sub>AR1AC</sub> e ARG <sub>AR2AC</sub> : (a) distribuição incremental de volume de poros, (b) distribuição acumulada do volume de poros.....  | 162 |
| Figura 4.33 | Imagens do MEV de amostras das frações pulverulentas: (a) imagem geral da FP1, (b) superfície de um grão da FP1, (c) imagem geral da FP1, (d) superfície de um grão da FP2.....  | 170 |
| Figura 4.34 | Análise qualitativa das principais fases cristalinas das frações pulverulentas (fases cristalinas versos intensidade dos picos) (a); difratograma da fração pulverulenta FP1 (b); difratograma da fração pulverulenta FP2.....       | 171 |
| Figura 4.35 | Resultados do PIM para amostras das argamassas padrão e recicladas: (a) distribuição incremental de volume de poros, (b) distribuição acumulada do volume de poros.....  | 180 |

## LISTA DE TABELAS

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Tabela 2.1  | Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural (Adaptado de ABNT NBR 15116:2004) .....                                    | 8   |
| Tabela 2.2  | Composição granuloquímicas dos finos da britagem primária e dos produtos da britagem secundária (Adaptado de ULSEN <i>et al.</i> 2010).....                          | 43  |
| Tabela 3.1  | Descrição das condições estudadas.....   | 69  |
| Tabela 3.2  | Ensaio realizado para cumprimento dos requisitos para agregado reciclado miúdo destinado ao preparo de concreto sem função estrutural (ABNT NBR 15116:2004) .....    | 70  |
| Tabela 3.3  | Normas de referência para os ensaios de caracterização física das areias estudadas.....  | 71  |
| Tabela 3.4  | Descrição das nomenclaturas adotadas para argamassas recicladas.....   | 75  |
| Tabela 3.5  | Porcentagens de substituições das frações granulométricas das areias recicladas no traço da argamassa padrão.....  | 75  |
| Tabela 3.6  | Caracterização do cimento Portland CII-F-32.....   | 76  |
| Tabela 3.7  | Compensação das massas de água e das massas das areias recicladas.....   | 79  |
| Tabela 3.8  | Consistências das misturas e as taxas de aditivo utilizados.....   | 80  |
| Tabela 3.9  | Ensaio físico-mecânico e as respectivas normas de referência....   | 80  |
| Tabela 3.10 | Requisitos químicos segundo a ABNT NBR 12653:2015.....   | 81  |
| Tabela 3.11 | Requisitos físicos segundo a ABNT NBR 12653:2015.....  | 81  |
| Tabela 3.12 | Teores de aditivos e os respectivos índices de consistência das argamassas: ARG <sub>AN</sub> , ARG <sub>FP1</sub> e ARG <sub>FP2</sub> .....                        | 91  |
| Tabela 3.13 | Possíveis resultados para o Teste t de amostras independentes e Teste Levene (MIRANDA, 2018) .....   | 92  |
| Tabela 4.1  | Ensaio realizado na areia AR1, para cumprimento da ABNT NBR 15116:2004 como ARC.....   | 95  |
| Tabela 4.2  | Ensaio realizado na areia AR2, para cumprimento da ABNT NBR 15116:2004 como ARC.....   | 95  |
| Tabela 4.3  | Ensaio realizado nas areias AR1 e AR2, antes e depois de submetidas às lavagens.....   | 98  |
| Tabela 4.4  | Fator de empacotamento dos grãos na condição areia composta.....   | 101 |
| Tabela 4.5  | Apanhado literário de resultados de: massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> ), absorção de água (%) e massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) .....                | 106 |
| Tabela 4.6  | Síntese do comportamento das areias recicladas.....  | 108 |
| Tabela 4.7  | Resultados dos principais óxidos presentes nas frações granulométricas da areia AN, AR1 e AR2.....   | 119 |
| Tabela 4.8  | Resultados de perda ao fogo nas frações granulométricas da areia AN, AR1 e AR2.....  | 122 |
| Tabela 4.9  | Desvios-padrão dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, das argamassas padrão e recicladas..... | 132 |
| Tabela 4.10 | Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias das argamassas padrão e recicladas.....   | 140 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabela 4.11 | Parâmetros de caracterização dos poros das amostras das argamassas.....   | 163 |
| Tabela 4.12 | Caracterização física as frações pulverulentas: FP1 e FP2.....  | 163 |
| Tabela 4.13 | Resultado da análise química por FRX da frações pulverulentas FP1 e FP2.....  | 173 |
| Tabela 4.14 | Requisitos químicos segundo a ABNT NBR 12653:2015: FP1 e FP2.....   | 175 |
| Tabela 4.15 | Diâmetros e superfície específica das frações FP1 e FP2 e Índice de Atividade Pozolânica (IAP) das argamassas ARG <sub>FP1</sub> e ARG <sub>FP2</sub> | 176 |
| Tabela 4.16 | Parâmetros de caracterização dos poros das amostras ARG <sub>FP1</sub> .....  | 181 |
| Tabela 4.17 | Parâmetros de caracterização dos poros das amostras ARG <sub>FP2</sub> .....  | 181 |



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| ABRECON                        | Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição |
| ABNT                           | Associação Brasileira de Normas Técnicas  |
| (a/c)                          | Relação de água/cimento   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de alumínio   |
| AFt                            | Trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita)                                |
| AN                             | Areia normal  |
| AR1                            | Areia de uma usina de RCD   |
| AR2                            | Areia de RC de corpos de prova de uma usina de concreto                           |
| ARC                            | Agregado reciclado de concreto  |
| ARM                            | Agregado reciclado misto  |
| CaO                            | Óxido de cálcio   |
| C <sub>3</sub> A               | Aluminato de cálcio   |
| C <sub>4</sub> AF              | Aluminato ferrita tetracálcico  |
| C <sub>2</sub> S               | Silicato dicálcico  |
| C <sub>3</sub> S               | Silicato tricálcico   |
| CaCO <sub>3</sub>              | Carbonato de Cálcio   |
| CH                             | Hidróxido de cálcio   |
| Ca(OH) <sub>2</sub>            | Hidróxido de cálcio ou cal  |
| Cl <sup>-</sup>                | Cloretos  |
| cm <sup>3</sup>                | Centímetro cúbico   |
| C-S-H                          | Silicato de cálcio hidratado  |
| DIN                            | Instituto Alemão de Normalização  |
| DRX                            | Difração de raio-x  |
| e                              | Índice de vazios  |
| E0                             | Fator de empacotamento  |
| EDS                            | Espectrofotometria por Energia Dispersiva   |
| FP1                            | Fração pulverulenta da areia AR1  |
| FP2                            | Fração pulverulenta da areia AR2  |
| FRX                            | Fluorescência de raio-x   |
| g                              | Gramas  |
| IAP                            | Índice de atividade pozolânica  |
| IPT                            | Instituto de Pesquisas Tecnológicas   |
| JCI                            | Instituto Japonês do Concreto   |
| K <sub>2</sub> O               | Óxido de potássio   |
| Kg                             | Quilograma  |
| LACER                          | Laboratório de Materiais Cerâmicos  |
| m <sup>3</sup>                 | Metro cúbico  |
| MCS                            | Materiais cimentícios suplementares   |
| µm                             | Micrómetro  |
| mg                             | Miligrama   |
| M                              | Massa de água corrigida   |
| ME                             | Massa específica  |
| MEV                            | Microscopia Eletrônica de Varredura   |
| MEV                            | Microscópio Eletrônico de Varredura   |
| MPa                            | Megapascal  |
| MU                             | Massa unitária  |
| Na <sub>2</sub> O              | Óxido de Sódio  |

|                 |   |
|-----------------|---|
| NBR             | Norma Brasileira Registrada no INMETRO                                  |
| NM              | Norma Mercosul  |
| PF              | Perda ao fogo   |
| PIM             | Porosimetria por intrusão de mercúrio                                   |
| RC              | Resíduo de concreto   |
| RCC             | Resíduo de construção civil   |
| RCD             | Resíduo de construção e demolição                                       |
| RILEM           | <i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i> |
| SSS             | Condição saturada com superfície seca                                   |
| SO <sub>4</sub> | Sulfato   |
| UnB             | Universidade de Brasília  |
| ZT              | Zona de transição   |

# 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, de acordo com a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2015), os resíduos gerados pelas atividades ligadas à construção civil representam, em média, 40% a 70% da quantidade total dos resíduos gerados anualmente; enquanto que na União Europeia esses resíduos representam cerca de 25% a 30%. De certa forma, o lado positivo é que boa parte destes resíduos são passíveis de serem reciclados, podendo ser transformados em agregados, minimizando o impacto ambiental e econômico gerado.

Os resíduos de construção e demolição (RCD) podem conter não só resíduos das construções e demolições, como também resíduos de concreto, gerados por exemplo por fábricas de pré-moldados ou concreteiras. Isso faz com que os RCD no Brasil, sejam compostos por cerca de 70% de concreto e/ou argamassa (ANGULO, 2005; ULSEN, 2011). Em relação aos resíduos de concreto (RC), gerados por cimenteiras, concreteiras ou fábricas de pré-moldados, estes apresentariam potencial de reciclagem próximo de 100%, uma vez que são compostos basicamente por concreto e argamassa (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013).

Com relação aos aspectos legais que envolvem a reciclagem dos resíduos de construção, o Brasil tem avançado, pois a Resolução CONAMA 307 (BRASIL, 2002) e as normas técnicas que entraram em vigor em 2004, inseriram o Brasil entre o grupo de países que se preocupam com a destinação de seus resíduos e o colocam em posição de vanguarda, quando comparado a outros países da América Latina. Contudo, o caminho é longo e ainda há um abismo entre o que prevê a legislação brasileira, e o que de fato se pratica.

A capital do país reflete esta realidade, pois até recentemente possuía o maior lixão em atividade da América Latina e o segundo maior do mundo, com 200 hectares de área lixo produzido. O Lixão da Estrutural estava em atividade desde a década de 1950 e foi desativado em janeiro de 2018. Atualmente o destino dos resíduos sólidos urbanos do Distrito Federal é o Aterro Sanitário de Brasília, contudo, até o momento, os resíduos de construção ainda continuam sendo encaminhados para o Lixão da Estrutural, agora transformado em aterro controlado do jóquei-club, até que sejam licitadas empresas para

processar esses resíduos e transformá-los em agregados reciclados (MARQUES, 2018; GDF, 2018).

O grande desafio dos dias atuais está em reintroduzir os resíduos de construção (RCD e RC) no ciclo da indústria da construção civil como agregados; pois devido às incertezas quanto ao seu desempenho em concretos e argamassas, há resistência do setor em empregá-los. Por outro lado, a exaustão de jazidas próximas aos grandes centros urbanos e a proibição da deposição de resíduos inertes em aterros sanitários têm feito crescer o consumo de agregados reciclados.

No caso dos agregados miúdos reciclados, seu uso têm alcançado grande interesse internacional, devido às implicações relacionadas à escassez de areias naturais adequadas à produção de materiais cimentícios (ULSEN, 2011). Paralelamente a isso, os mesmos são muitas vezes gerados de forma involuntária durante o processo de britagem, logo sua demanda pode significar, segundo Angulo (2005), a viabilidade econômica da usina de reciclagem. No caso das usinas de RCD, sua representatividade em massa é de aproximadamente 50% (ANGULO, 2005). Sendo assim, estudos sobre a aplicação de agregados miúdos reciclados se justificam, pois, o tema assume uma importância não só social e ambiental, como também econômica.

Sob a qualidade técnica das areias recicladas, segundo Evangelista *et al.* (2015), para a produção de materiais cimentícios os agregados reciclados graúdos costumam ser mais aceitos que os miúdos. Isto se deve à maior heterogeneidade, maior capacidade de absorção de água e ao maior risco de presença de contaminantes nos agregados miúdos. No entanto, pesquisas mostram (EVANGELISTA e DE BRITO, 2010; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; MALTA *et al.*, 2014; RODRIGUES e FUCALE, 2014; BALDUSCO DA SILVA, 2015; BEDOYA e DZUL, 2015; EVANGELISTA *et al.*, 2015) que as areias recicladas, tanto de RCD quanto de RC, podem apresentar características técnicas aceitáveis e comportamentos mecânicos compatíveis com os das areias naturais.

Estudos recentes (BRAGA, DE BRITO e VEIGA, 2012; ELAQRA, 2015; LI *et al.*, 2017; GALLETTO *et al.*, 2017; HO *et al.*, 2018) mostram que também há potencial no uso da fração pulverulenta destes materiais como materiais cimentícios suplementares (MCS),

ou como materiais de enchimento. Já pulverulentos que apresentem conteúdos significativos de óxido de cálcio (CaO) e óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) teriam potencial para serem aplicados como matéria-prima alternativa na indústria do cimento (ULSEN *et al.*, 2010).

Sendo assim, pesquisas sobre agregados reciclados são importantes no sentido de buscar novas alternativas de aplicação destes materiais, que, apesar de apresentarem características peculiares, têm mostrado viabilidade técnica para aplicação em argamassas e concretos.

## **1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA**

Acreditando haver diferenças entre as características físicas, químicas e microestruturais das frações granulométricas dos agregados miúdos \_ provenientes de processos de reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) e de resíduo de concreto (RC) \_ o trabalho pretende contribuir no avanço do conhecimento testando a influência do emprego de frações específicas destes materiais em argamassas.

Pesquisadores (EVANGELISTA e DE BRITO, 2010; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; MALTA *et al.*, 2014; RODRIGUES e FUCALE, 2014; BALDUSCO DA SILVA, 2015; BEDOYA e DZUL, 2015; EVANGELISTA *et al.*, 2015) têm estudado os agregados miúdos reciclados, porém tais estudos normalmente tentam enquadrá-los à curva granulométrica dos agregados convencionais, o que segundo Levy (2001), é uma tarefa complexa. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), decidir se a granulometria do agregado reciclado pode ser considerada aceitável ou não para produção de concreto, ainda é objeto de discussão no meio técnico, que não apresenta consenso sobre o assunto. Neste sentido, o estudo inova na forma de avaliar a incorporação das areias recicladas à mistura, trabalhando com substituições de frações específicas e não tentando enquadrá-las a uma curva granulométrica convencional, como de costume. Com isso, o estudo está inserido no contexto atual das pesquisas que avançam no entendimento e em novas possibilidades da aplicação dos agregados miúdos reciclados para a produção de concretos e argamassas.

Compreender o comportamento das propriedades dos materiais a partir do conhecimento de sua microestrutura é fundamental para o avanço da ciência no sentido de melhorar a

qualidade dos materiais. Neste sentido, o estudo almeja compreender os comportamentos físico-mecânicos das argamassas com 100% de agregados miúdos reciclados de RCD e de RC, a partir do conhecido da configuração e da estrutura porosa das argamassas recicladas.

Em relação à microestrutura dos materiais, destaca-se a necessidade de estudos sobre a zona de transição dos materiais cimentícios. Uma vez que é considerada o elo mais fraco de uma mistura, ela governaria propriedades como resistência mecânica e módulo de elasticidade (LEE e CHOI, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Em se tratando de misturas com agregados reciclados, o desafio é dobrado, pois estas costumam apresentar duas zonas de transição, o que torna a microestrutura dessas misturas ainda mais complexa que as convencionais.

Destacam-se os trabalhos de Poon, Shui e Lam (2004); Leite e Monteiro (2016); Li *et al.* (2017); Shi *et al.* (2017) que investigaram as morfologias das zonas de transição (ZT) de agregados graúdos reciclados. Contudo, trabalhos como os desenvolvidos por Ying, Zhou e Xiao (2017) e Ho *et al.* (2018), que tratam sobre as ZT de agregados miúdos reciclados, são encontrados em menor quantidade. Nesta temática, este estudo pretende investigar a configuração geral das argamassas recicladas, e das zonas de transição (ZT) dos agregados miúdos reciclados.

Uma característica importante da microestrutura dos materiais se refere a sua estrutura porosa. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a estrutura porosa dos materiais cimentícios exerce influência em propriedades como absorção, massa específica, permeabilidade e resistência mecânica. Como os agregados reciclados costumam ser mais porosos, a princípio os materiais cimentícios com agregados reciclados apresentariam também uma estrutura mais porosa (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013). Contudo, indaga-se se a presença de finos e a forma irregular de suas partículas não poderiam ser capazes de gerar um melhor empacotamento de grãos e assim compensar a alta porosidade de suas partículas. Neste sentido, o trabalho propõe investigar a estrutura porosa de argamassas com agregado miúdo reciclado, tentando compreender seus comportamentos físicos mecânicos a partir de suas redes porosas.

Atualmente trabalhos têm investigado o potencial de aplicação de resíduos de diferentes fontes industriais, como pozolanas, matéria-prima alternativa para a indústria do cimento ou como material de enchimento. Logo, o trabalho pretende contribuir com a literatura técnica, investigando sobre o potencial de pozolanicidade das frações pulverulentas dos agregados miúdos reciclados, em substituição parcial ao cimento, avaliando também sua capacidade de refinar poros.

Sendo assim, acredita-se que este estudo é de grande relevância, uma vez que propõe:

- pensar na possibilidade de novos *designs* de misturas, partindo do pressuposto que as frações granulométricas dos agregados miúdos reciclados apresentam características diferentes, e que, portanto, estas características influenciariam de forma distinta nas propriedades de argamassas e concretos;
- investigar a microestrutura de argamassas com agregado miúdo reciclado, assunto de grande relevância e ainda pouco explorado no meio científico; e
- continuar os estudos existentes sobre os materiais pulverulentos dos resíduos de construção, visando um melhor entendimento quanto às possibilidades de aplicação de um rejeito da indústria da reciclagem de resíduos de construção.

## **1.2 OBJETIVOS**

Investigar a influência das frações granulométricas de dois agregados miúdos de RCD e de RC no comportamento físico-mecânico de argamassas recicladas.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Caracterizar física, química e microestruturalmente as frações granulométricas que compõem os agregados miúdos de RCD e RC;
- Avaliar diferentes frações e proporções de substituições dos agregados miúdos reciclados no comportamento físico-mecânico das argamassas recicladas;
- Investigar a configuração microestrutural e a estrutura porosa das argamassas com 100% de agregado miúdo reciclado; e
- Estudar sobre a pozolanicidade das frações pulverulentas dos agregados miúdos reciclados.

### **1.3 ESTRUTURA DA TESE**

Neste primeiro capítulo do trabalho são apresentadas a introdução e; a motivação da pesquisa, na sequência são apresentados os objetivos e a estrutura da tese.

O segundo capítulo apresenta a revisão da literatura científica que começa fazendo apanhado geral sobre a legislação e os desafios técnicos quanto ao uso dos agregados reciclados. Na sequência, discutem-se as características físicas, mineralógicas, químicas e microestruturais dos agregados reciclados e como estas características influenciam os comportamentos físico-mecânicos e microestruturais de misturas cimentícias. O capítulo segue abordando alguns conceitos sobre os materiais cimentícios suplementares, apresentando possibilidades para aplicação destes materiais alternativos. Por fim, faz-se um apanhado das técnicas microestruturais aplicadas na pesquisa que embasam esta tese.

O terceiro capítulo apresenta o programa experimental do trabalho, com descrições detalhadas sobre as partes e as etapas que compuseram a pesquisa, demonstrando a metodologia empregada para a caracterização dos materiais, assim como as condições de execução dos ensaios físico-químicos e das análises microestruturais realizadas. Esse capítulo se encerra apresentando os testes estatísticos usados para analisar a significância dos resultados do trabalho.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados experimentais, por meio de tabelas e gráficos, realizando-se a análise dos dados obtidos e fazendo, sempre que possível, comparações com os resultados de outros estudos científicos. A apresentação dos resultados segue a mesma divisão do capítulo anterior.

Já o quinto capítulo apresenta as conclusões elaboradas a partir dos resultados experimentais obtidos e traz sugestões para trabalhos futuros, relacionados à pesquisa e, finalmente, apresentam-se as referências utilizadas na realização deste trabalho.



## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Neste capítulo serão abordados assuntos fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa com considerações a respeito dos padrões legislativos que regem os agregados reciclados e sua composição; sobre suas características e como estas características vão influenciar no comportamento físico-mecânico e microestrutural dos materiais cimentícios. Também serão apresentados um item sobre os materiais cimentícios suplementares e outro sobre as técnicas de caracterização microestruturais que serão utilizadas no trabalho.

### **2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE NORMATIZAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS**

A seguir fazem-se considerações a respeito dos padrões normativos dos agregados reciclados de diferentes países, incluindo o Brasil, numa abordagem sobre sua classificação e requisitos. Na sequência, traça-se discussão sobre a composição dos resíduos de construção e sua influência sobre a heterogeneidade dos agregados produzidos a partir deles.

#### **2.1.1 Normatização**

Segundo Pacheco-Torgal *et al* (2013), padrões e diretrizes elaborados por comitês técnicos, agências de pesquisa e organizações de padronização, estão se esforçando para incentivar o uso de agregados reciclados de diferentes origens, o que motivaria todos eles a estabelecerem valores-limite relativos à composição dos agregados reciclados.

No Brasil a norma que dita os requisitos para o uso do agregado reciclado é a ABNT NBR 15116:2004- Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos (Tabela 2.1 a seguir). A ABNT NBR 15116:2004 admite o emprego do agregado reciclado em substituições parciais ou totais, desde que os resíduos utilizados na sua produção sejam classificados como “Classe A”<sup>(a)</sup>, pela Resolução CONAMA 307.

**Tabela 2.1: Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural (Adaptado de ABNT NBR 15116:2004).**

| Propriedades   |                                    | Agregado reciclado “Classe A” |       |        |       | Norma de ensaio     |                     |
|--|------------------------------------|-------------------------------|-------|--------|-------|---------------------|---------------------|
|  |                                    | ARC                           |       | ARM    |       |                     |                     |
|  |                                    | Graúdo                        | Miúdo | Graúdo | Miúdo | Agregado graúdo     | Agregado miúdo      |
| Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)  |                                    | ≥90                           | -     | < 90   | -     | Anexo A             | -                   |
| Absorção de água (%)   |                                    | 7                             | 12    | 12     | 17    | ABNT NBR NM 53      | ABNT NBR NM 30:2001 |
| Contaminantes, teores máximos com relação à massa do agregado reciclado (%)  | Cloretos                           | 1                             |       |        |       | ABNT NBR 9917:2009  |                     |
|  | Sulfatos                           | 1                             |       |        |       | ABNT NBR 9917:2009  |                     |
|  | Materiais não minerais             | 2                             |       |        |       | Anexo A             | Anexo B             |
|  | Torrões de argila                  | 2                             |       |        |       | ABNT NBR 7218:2010  |                     |
|  | Teor total máximo de contaminantes | 3                             |       |        |       | -                   |                     |
| Teor de material passante na malha de 75µm (%)   |                                    | 10                            | 15    | 10     | 20    | ABNT NBR NM 46:2003 |                     |
| Para efeitos desta norma são exemplos materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados, cerâmicos. |                                    |                               |       |        |       |                     |                     |

Em relação à classificação, a maioria das especificações separa os agregados reciclados em categorias, com base na sua composição visual em: agregados reciclados de concreto (ARC), provenientes dos RC ou RCD; agregados reciclados mistos (ARM), provenientes dos RCD e agregados reciclados de alvenaria (ARA), provenientes dos RCD (GONÇALVES e DE BRITO, 2010; AGRELA *et al.*, 2011; MAS *et al.* 2012; SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014).

Contudo países como o Brasil (Tabela 2.1), Dinamarca, Suíça e Noruega classificam os agregados reciclados apenas como ARC e ARM. Já em Hong-Kong, só são reconhecidos e permitidos o uso dos ARC, e no Japão apenas os ARM (GONÇALVES e DE BRITO, 2010). Segundo Pacheco-Torgal *et al.* (2013), é possível classificá-los também com base na sua composição mineralógica.

- (1) Resíduos Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras (BRASIL, 2002).

A ABNT NBR 15116: 2004 (Tabela 2.1), concorda com as especificações como a DIN 4226-100 da Alemanha, e a E 471 de Portugal, de que os agregados reciclados de concreto (ARC) devem ser compostos por mais de 90%, em massa, de fragmentos à base de cimento Portland e rochas (GONÇALVES, 2007; GONÇALVES, DE BRITO, 2010; SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014); e que os agregados reciclados mistos (ARM), seriam compostos de concreto triturado e entulho de alvenaria (SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014). Sua composição \_ segundo a ABNT-NBR 15116:2004 e a norma Britânica BS 8500:2006 \_ deve apresentar teor inferior a 90% de fragmentos à base de cimento Portland e rochas (SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014).

É importante destacar, que a ABNT NBR 15116:2004 , faz menção ao teor de fragmentos à base de cimento e rochas \_  $\geq 90\%$  para os ARC e  $< 90\%$  para os ARM \_ , apenas para os agregados reciclados graúdos, cujo teste é realizado através de procedimento por análise visual. No caso dos agregados miúdos, estes seriam classificados como ARC ou ARM, em função do cumprimento dos requisitos: absorção de água, contaminantes e teor de material passante na malha de  $75\mu\text{m}$  (Tabela 2.1).

Em relação à aceitação dos agregados miúdos reciclados, de forma geral os padrões internacionais ainda se mantêm conservadores com relação ao seu uso, apesar de pesquisas científicas mostrarem que há viabilidade técnica na sua aplicação em concretos e argamassas (ver item 1.2). Países como Alemanha, Portugal, Espanha e Reino Unido, seguem as recomendações da RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*), e não especificam sobre o uso do agregado miúdo, recomendando que caso o mesmo seja utilizado, este deverá atender aos requisitos de uma areia natural.

Já países como a Dinamarca, permitem o uso dos agregados miúdos reciclados em concretos com até 40MPa, mas limita seu teor de substituição a no máximo 20% (GONÇALVES e DE BRITO, 2010). Por outro lado, países como Japão, Suíça e Brasil, permitem a utilização dos agregados miúdos reciclados em teores de substituição de até 100%. No Japão, a *Building Contractors Society of Japan*, permite o uso da areia mista somente em concreto não-estrutural com no máximo 12 MPa. Na Rússia é possível a substituição de 100% de areias mistas em concretos com até 15MPa e 50% de areia mistas em concretos com até 20MPa. A Suíça publicou em 2006 a Ot 70085 (*Objectif Technique*)

“*Instruction technique Utilisation de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d’abris*”, que permite a substituição integral do agregado miúdo de concreto, em concreto reforçado ou concreto protendido, desde que sejam realizados testes adicionais. Por fim no Brasil, a ABNT NBR 15116:2004 permite substituição integral de agregado miúdo de concreto ou misto, em concretos sem função estrutural com até 15MPa (Tabela 2.1).

Segundo Gonçalves e De Brito (2010), em relação aos requisitos, estes apresentam variações significativas de valores, dependendo do padrão ou da diretriz de cada país. Em relação a absorção de água por exemplo, os autores afirmam que este requisito apresentou a maior variação dentre as legislações por eles estudadas, com variações de 7 a 15% para ARC e de 7 a 20% para ARM, englobando tanto os agregados miúdos, quanto os graúdos. Em relação ao padrão brasileiro, os agregados miúdos se enquadrariam às faixas apresentadas, com taxas de absorção de água máxima de 12% para areias de ARC e 17% para areias de ARM (Tabela 2.1). Segundo Ulsen (2011), a absorção de água é o parâmetro de maior controle segundo normas internacionais que se referem essencialmente aos agregados graúdos.

No que diz respeito ao requisito teor máximo de contaminantes, independentemente da classificação ou da granulometria do agregado reciclado, Pacheco-Torgal *et al.* (2013) afirmam que estes variam de 1% a no máximo 5%, sendo que com relação aos conteúdos de sulfato e cloretos, estes costumam ser limitados a no máximo 1% para cada (conforme recomendações da RILEM). A ABNT NBR 15116:2004 se enquadra aos padrões internacionais, limitando um teor máximo de 3% de contaminantes totais, sendo permitida a presença em massa de no máximo 1% de cloreto e 1% sulfato (Tabela 2.1).

Com base nas comparações colocadas acima, pode-se dizer que a ABNT NBR 15116:2004 apresenta-se de forma geral coerente aos padrões internacionais no que se refere à classificação e aos requisitos quanto ao uso dos agregados reciclados. Somando-se a isso, ao permitir o uso integral das areias recicladas, a norma brasileira se mostra atenta às pesquisas científicas da área, assumindo uma postura contemporânea, ao mesmo tempo que se mostra sensível às questões ambientais e econômicas que envolvem sua inclusão.

### **2.1.2 A composição dos resíduos de construção e sua influência sobre a heterogeneidade dos agregados reciclados**

A resolução 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), define como resíduos de construção civil “*aqueles materiais provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da 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, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha*” (BRASIL, 2002). Contudo trabalhos atuais (ULSEN *et al.*, 2013a; KAHN *et al.*, 2014; SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014), têm utilizado uma nomenclatura mais ampla, referindo-se a estes resíduos como resíduos de construção e demolição (RCD). Já os resíduos de concreto (RC), seriam aqueles oriundos de rejeitos de demolição de estruturas de concreto, resíduos de usinas de concreto, fábricas de elementos pré-moldados, corpos de prova de concreto de controle de qualidade e pavimentos de concreto. (BUTTLER, 2003, EVANGELISTA *et al.*, 2015).

Sabe-se que os resíduos de construção são heterogêneos, o que segundo Malta *et al.* (2014), dificultaria o desenvolvimento de métodos e modelos capazes de controlar e prever as características dos agregados reciclados, impossibilitando traçar sua influência sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais cimentícios.

Neste sentido, pesquisas (BUTTLER, 2007; SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014 e MALTA *et al.*, 2014) afirmam que os agregados reciclados produzidos a partir dos RCD, seriam mais heterogêneos que os agregados reciclados produzidos a partir de RC, fazendo com que aqueles agregados fossem mais aplicados em situações de menor exigência de qualidade, como na pavimentação, por exemplo. Logo os RC seriam considerados menos heterogêneos que os RCD, pois seriam compostos basicamente por concreto e argamassa, enquanto que nos RCD podem estar presentes além de concreto e argamassa; resíduos de gesso, de bloco e de telha por exemplo. Contudo, apesar da gama de possibilidades de materiais presentes nos RCD, eles seriam adequados para a atividade de reciclagem, uma vez que a fração inorgânica prevaleceria (ULSEN *et al.*, 2010).

A heterogeneidade dos resíduos de construção pode ser vista não só sob a perspectiva da quantidade de materiais presentes, mas também sob o aspecto das fontes geradoras. De acordo com Katz (2002), agregados reciclados produzidos a partir de mais de uma fonte geradora apresentariam qualidade variável. É o caso dos agregados produzidos em usinas de reciclagem, que recebem resíduos de várias origens (RCD). Por outro lado, segundo Katz (2002), se uma fonte uniforme de agregado reciclado for garantida, a princípio as características dos agregados reciclados produzidos seriam uniformes. Seria o caso por exemplo, de agregados produzido a partir de resíduos de demolição de um antigo pavimento, ou de uma fábrica de pré-moldados rotineiramente fabricados a partir do mesmo tipo de concreto.

Com base nas colocações apresentadas acima, é razoável pensar que os agregados reciclados de concreto (ARC), produzidos a partir de resíduos de construção e demolição (RCD) das usinas brasileiras, apresentariam qualidade mais variável que os ARC produzidos a partir apenas de resíduos de concreto (RC). Pois além dos RCD serem oriundos de diversas fontes, segundo Angulo (2005) a separação do concreto das demais frações nas usinas de RCD brasileiras ainda é onerosa e difícil, uma vez que é realizada visualmente. Por outro lado, os ARC produzidos a partir de RC também podem apresentar alta heterogeneidade, caso os mesmos não sejam produzidos a partir de uma mesma fonte.

Além do material de origem, outro aspecto relevante na composição e qualidade final dos agregados reciclados se refere ao processo de beneficiamento. Neste sentido, estudos (ANGULO, 2005; TENÓRIO, 2007; DE JUAN e GUTIERREZ, 2009; PAVÓN, 2010; ULSEN *et al.*, 2013b; KAHN *et al.*, 2014; EVANGELISTA *et al.*, 2015) têm testado diferentes processos de beneficiamento, sendo que boa parte destes estão voltados para a eficiência de remoção da pasta de cimento aderida, considerada como o maior desafio quanto ao uso dos agregados reciclados. Sendo assim, indaga-se se não seria injusta a desvalorização dos ARC oriundos dos RCD, em detrimento dos ARC oriundos de RC. Pois se por um lado os ARC oriundos de RC são normalmente menos heterogêneos (compostos por 100% de concreto), por outro lado, os mesmos apresentariam maiores teores de pasta de cimento que os ARC produzidos a partir dos RCD.

## 2.2 PASTA DE CIMENTO

Quando o concreto é britado, parte da pasta de cimento pode permanecer aderida às partículas do agregado reciclado. Como ela costuma ser de baixa densidade e apresenta alta taxa de absorção de água e conteúdo de sulfatos, sua presença é responsável pelas piores características dos agregados reciclados (ETXEBERRIA e VÁZQUEZ, 2007; DE JUAN e GUTIÉRREZ, 2009). Estas características influenciarão de forma negativa na qualidade do concreto produzido com estes agregados, principalmente no que se refere às propriedades relacionadas à elasticidade, retração, fluência, durabilidade e resistência (KAHN *et al.*, 2014).

Faz-se aqui uma ressalva quanto ao uso dos termos: pasta de cimento aderida ou argamassa aderida. Os dois termos costumam ser utilizados, sendo que o termo pasta de cimento é normalmente utilizado em estudos sobre agregados miúdos (ULSEN *et al.*, 2013b; KAHN *et al.*, 2014; EVANGELISTA *et al.*, 2015) e o termo argamassa aderida em estudos sobre agregados graúdos (DE JUAN e GUTIÉRREZ, 2009; LEITE e MONTEIRO, 2016).

### 2.2.1 O teor de pasta de cimento nos agregados reciclados

Segundo Hansen e Narud (1983), a pasta de cimento estaria presente em cerca de 40% a 50% do volume dos agregados reciclados de concreto (ARC). Contudo pesquisas mais recentes (LI, 2008; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013) afirmam que o teor pode variar ainda mais, de 20% a 70% da massa do agregado reciclado.

Pesquisas (TOPÇU e SENDEL, 2004; DE JUAN, 2005; ULSEN *et al.*, 2010; ULSEN *et al.*, 2013b; KAHN, *et al.*, 2014) apontam que os agregados reciclados miúdos apresentam maior quantidade de pasta de cimento aderida que os agregados reciclados graúdos. Topçu e Sengel (2004), por exemplo, trabalharam com agregados de RC e encontraram teores médios de 30% de pasta de cimento aderida em agregados reciclados graúdos e em torno de 60% nos agregados miúdos. O estudo de De Juan (2005) com agregados de RCD, também mostrou que os agregados miúdos apresentam maiores quantidades de pasta de cimento aderida (de 32,6% a 60,2%) que os agregados graúdos (de 23,4% a 52,1%).

A quantidade de pasta de cimento aderida ao agregado reciclado vai variar dependendo da origem do resíduo e do processo de beneficiamento adotado. Em relação ao processo de beneficiamento, pesquisas (ANGULO, 2005; TENÓRIO, 2007; PAVÓN, 2010; ULSEN *et al.*, 2013b; EVANGELISTA *et al.*, 2015) têm mostrado que o modelo do britador, a abertura de sua mandíbula e o número de vezes que o resíduo será submetido a britagem vão produzir agregados reciclados com maior ou menor presença de pasta de cimento aderida. A (s) etapa (s) de britagem influencia (m) não apenas na quantidade de pasta de cimento aderida ao agregado, mas também na forma e na granulometria dos agregados reciclados (DE JUAN e GUTIÉRREZ, 2009).

Por ser a pasta de cimento a principal dificuldade na produção do agregado miúdo, métodos de quantificação e remoção têm sido estudados (ULSEN *et al.*, 2010; KAHN *et al.*, 2014; BONIFAZI, PALMIERI e SERRANTI, 2018). Pesquisadores (ANGULO, 2005; ULSEN *et al.*, 2010, KAHN *et al.*, 2014; EVANGELISTA *et al.*, 2015) têm estimado o teor de pasta de cimento a partir da presença do CaO, detectado através da análise química da amostra de agregado. Ao passo que a presença da fase gipso \_ detectada através da análise mineralógica \_ também seria indicativo de pasta de cimento na amostra (DE JUAN e GUTIÉRREZ, 2009; AGRELA *et al.*, 2011).

Kahn *et al.* (2014) por exemplo, trabalharam com distintas frações de uma areia reciclada produzida a partir da britagem terciária de resíduos de construção e demolição (RCD). Os pesquisadores adoraram o método de separações sequenciais por líquidos densos com quantificação através da soma dos teores de óxido de cálcio (CaO) e perda ao fogo (PF). Os resultados mostraram que houve diminuição dos teores CaO+PF, com o aumento da densidade das frações da areia, confirmando a correlação entre CaO+PF e conteúdo de pasta de cimento porosa.

Ulsen *et al.* (2013b) testaram dois métodos para separar a pasta de cimento de agregados miúdos. A eficiência da chamada “liberação da fase mineral” foi testada por meio do método de separações sequenciais por líquidos densos e do método de separação magnética. Segundo a pesquisadora e seus colaboradores, os dois métodos foram eficazes na redução do conteúdo de pasta aderida, com redução de 80% para concentração de densidade e 60% para separação magnética.



Já Bonifazi, Palmieri e Serranti (2018) desenvolveram um sensor inovador, usando imagens hiperespectrais (HSI) na faixa do infravermelho próximo (1000 – 1700) nm, para avaliar o teor de pasta de cimento aderida à superfície do agregado reciclado. Uma função do Matlab<sup>(2)</sup> permitiu medir a porcentagem de pixels pertencentes ao agregado e a pasta de cimento em cada amostra. Os resultados demonstraram que a proposta pode ser utilizada para realizar análise rápida, não destrutiva e de baixo custo.

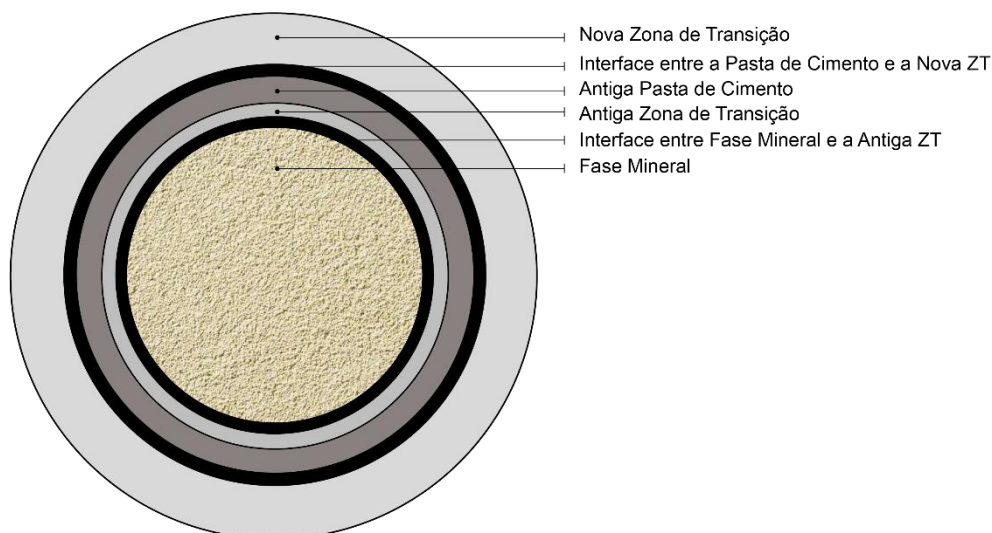
### **2.2.2 A microestrutura dos materiais cimentícios com presença da pasta de cimento endurecida**

Segundo Padilha (1997), a microestrutura de um material é constituída das fases presentes no material e dos defeitos cristalinos. São três as fases presentes em um concreto ou argamassa: a fase mineral, a fase pasta de cimento hidratada e a fase zona de transição. Conforme esta mesma pesquisa, são elas que determinam as propriedades de um concreto ou argamassa, e cada uma tem em si um caráter multifásico. Por exemplo, cada partícula de agregado pode conter vários minerais, além de microfissuras e vazios. Da mesma forma, tanto a matriz da pasta de cimento hidratada quanto a zona de transição na interface, geralmente, contêm uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras. Quanto aos defeitos cristalinos, Padilha (1997) ainda afirma que estes têm ampla faixa de tamanhos e características diferenciadas.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), as propriedades têm origem em sua microestrutura, logo estudar a microestrutura dos agregados reciclados e dos materiais cimentícios que contêm estes materiais é de fundamental importância para compreensão do material como um todo. Indiferentemente de serem os agregados reciclados, graúdos ou miúdos, oriundos de RC ou de RCD, a pasta de cimento normalmente está presente nestes materiais. Neste sentido, De Juan e Gutiérrez (2009) afirmam que os agregados reciclados se diferem dos agregados naturais principalmente na medida em que aqueles são compostos por dois materiais diferentes: o agregado natural e a pasta de cimento, o que segundo Tam, Gao, Tam (2005), faz com que a microestruturura dos materiais cimentícios com agregados reciclados seja muito mais complexa.

(2) Matlab - (MATrix LABoratory) trata-se de um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional. (<https://www.mathworks.com/products/matlab.html> visto em jan, 2019).

Neste caso os concretos e argamassas com incorporação de agregados reciclados estariam sujeitos a apresentar duas zonas de transição: uma antiga \_ entre o agregado natural e a matriz de cimento antiga \_ e uma nova – entre o agregado reciclado e a nova matriz cimentícia (LEITE e MONTEIRO, 2016). A ilustração da Figura 2.1, mostra um grão de agregado reciclado onde é possível observar a nova ZT e a antiga ZT.



**Figura 2.1 – Ilustração esquemática de um grão de agregado reciclado composto pela antiga e pela nova zona de transição.**

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a zona de transição (ZT) governaria propriedades como resistência à compressão e módulo de deformação, sendo normalmente o elo mais fraco nos concretos e argamassas. Lee e Choi (2013) demonstraram, através da aplicação da técnica de microdureza, que de fato a ZT é o elo mais fraco de um concreto. Os pesquisadores chegaram a valores de dureza que variaram em média de 310 HV a 280 HV no agregado graúdo natural, se mantiveram em torno de 40 HV na nova matriz cimentícia, chegando a valores na ordem de 10HV na região da ZT.

A zona de transição \_ ou nova zona de transição no caso dos agregados reciclados \_ (Figura 2.1) é uma camada formada entre o agregado (com pasta aderida ou não) e a matriz cimentícia, que tem cerca de 40 a 50 $\mu$ m (TAM, GAO, TAM, 2005; LI *et al.*, 2017). Nesta região segundo Li *et al.* (2017), prevalece a formação de hidróxido de cálcio (CH). Estas partículas não seriam capazes de se ligar intimamente ao agregado, fazendo com que esta região tenha porosidade de duas a três vezes maior que a matriz cimentícia.

Também há chances de formação de coloides de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e de etringita (AFt). (LI *et al.*, 2017).

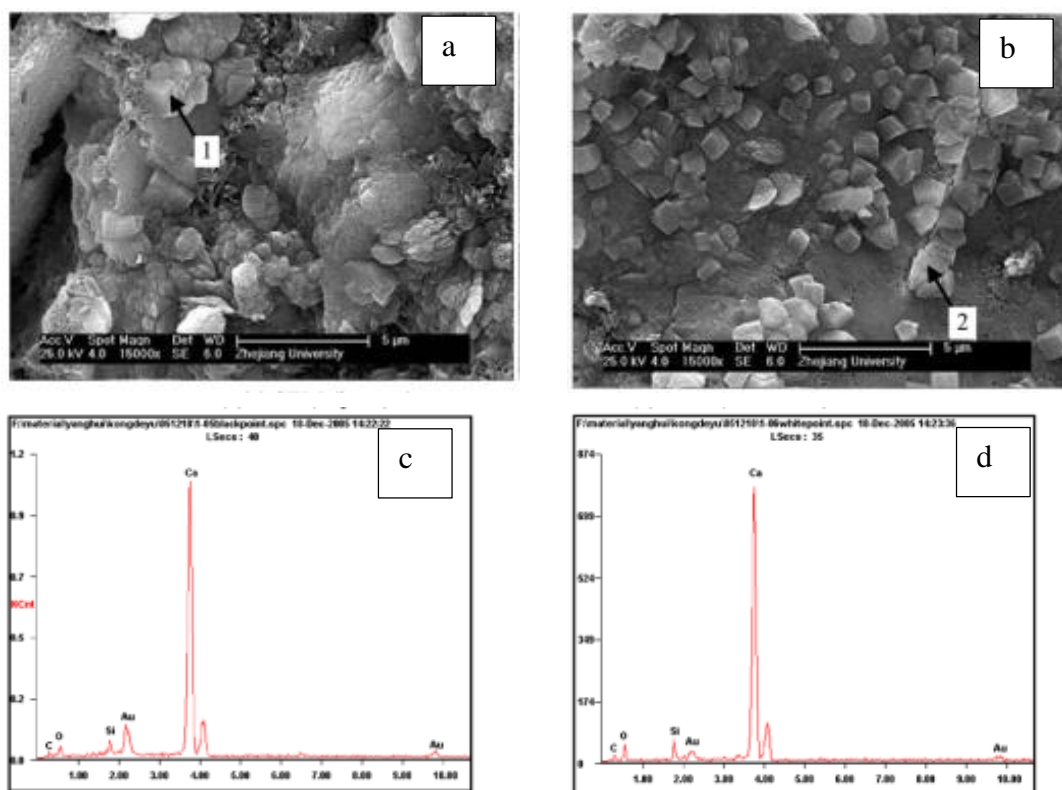
De acordo com Vargas, Restrepo-Baena e Tobón (2017), a distribuição de tamanho de grão do cimento, a relação água/cimento, o tamanho agregado e o tipo de agregado têm importantes efeitos sobre as propriedades da zona de transição. Sendo assim, acredita-se que a sua espessura também poderá variar além dos limites de 40 a 50µm.

Apesar da maior porosidade desta região, Leite (2001) afirma que nos concretos e argamassas com agregados reciclados, a nova zona de transição seria de melhor qualidade do que aquela formada entre o agregado natural e a matriz cimentícia. Tal fato se deve, segundo a pesquisadora, à angulosidade e à textura rugosa dos agregados reciclados, que fariam melhorar a aderência entre a pasta e o agregado. Além disso, a absorção da pasta de cimento faria com que cristais de hidratação precipitassem naquela região propiciando um melhor fechamento da mesma (LEE e CHOI, 2013).

A ZT, ou nova ZT no caso dos agregados reciclados, apresenta uma região conhecida como zona de transição na interface, ou simplesmente interface (Figura 2.1). Com uma espessura de cerca de 1 µm, esta região é composta de uma dupla camada, como um "filme duplex", de cristais de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) orientados para o lado do agregado e gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), orientado para o lado da pasta de cimento (CHANDRA e BERNTSSON, 2002 *apud* VARGAS, RESTREPO-BAENA e TOBÓN, 2017). Segundo Padilha (1997), a ZT na interface, geralmente contém uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, que segundo Metha e Monteiro (2014), não permitiriam as transferências de tensão, portanto seriam a região mais frágil da ZT.

Já a antiga zona de transição, apresentaria minúsculos poros e fissuras que demandariam maior quantidade de água, fazendo com que a quantidade de água da mistura fosse reduzida, podendo vir a prejudicar o processo de hidratação da mistura (LEITE; MONTEIRO, 2016). Nesta região também prevaleceria a formação de cristais de hidróxido de cálcio (CH).

O estudo de Kong *et al.* (2010) sobre microestrutura de agregados reciclados, mostra a superfície rugosa e a presença de grandes cristais de hidróxido de cálcio (CH) nos poros do agregado reciclado (fase mineral) e na antiga pasta de cimento aderida à superfície (Figura 2.2).



**Figura 2.2 – Imagem do MEV no poro do agregado graúdo reciclado (a), imagem do MEV na superfície do agregado (b), EDS do ponto 1 (c), EDS do ponto 2 (d). (KONG *et al.*; 2010)**

A antiga zona de transição apresenta uma interface, a “zona de transição na interface” faria a junção zona de transição e o mineral (agregado original) (Figura 2.1). A interface da antiga ZT, segundo Leite e Monteiro (2016) também seria a região mais frágil na antiga ZT, uma vez que esta faria com que a microestrutura do concreto se tornasse mais frágil, devido à sua maior porosidade.

Como a microestrutura dos materiais cimentícios sofrem influência direta da alta porosidade dos agregados reciclados, pesquisadores têm estudado, além de técnicas para remoção da pasta de cimento (item 2.2 A), formas de densificar as ZTs. Para tal, pesquisas têm testado diferentes processos de misturas (TAM, GAO e TAM, 2005; KONG *et al.*, 2010; LEITE e MONTEIRO, 2016) e/ou o uso de materiais cimentícios suplementares (LI *et al.*, 2010; LI *et al.*, 2017; YING, ZHOU e XIAO, 2017; HO *et al.*, 2018). Os

resultados, de forma geral, têm mostrado melhoras das características das zonas de transições através de um empacotamento mais denso, com melhoras também na trabalhabilidade e no comportamento mecânico dos concretos e argamassas estudados.

## **2.3 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS**

Para que os agregados reciclados sejam aceitos em determinadas aplicações eles devem atender certos requisitos físicos e químicos que dependem do material de origem e do processo de beneficiamento ao qual eles foram submetidos (ver itens 2.1 e 2.2). Em relação aos agregados convencionais, os reciclados são mais absorventes, menos densos, têm forma irregular e textura rugosa, além de apresentarem mais susceptibilidade à contaminação, devido à presença da pasta de cimento. A seguir traçam-se comentários a respeito das principais características dos agregados reciclados, relacionando-as à influência da presença da pasta de cimento.

### **2.3.1 Absorção de Água**

A presença da pasta de cimento no agregado reciclado, faz com que o mesmo apresente uma superfície rugosa e muitas vezes fissurada, tornando-o mais poroso. Logo, a maior capacidade de absorção de água dos agregados reciclados, se deve a sua maior porosidade. Os resultados do estudo de Gómez-Soberón (2003) com agregados reciclados graúdos de concreto, mostrou que os mesmos apresentam diâmetro médio de poros cerca de 40% maior que o dos agregados naturais.

Enquanto os agregados miúdos costumam apresentar valores de absorção de água que oscilam entre 0% e 4%, os agregados miúdos de RCD ou de RC (KATZ, 2002; CORINALDESI, 2009; EVANGELISTA e DE BRITO, 2010; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; HWANG *et al.*, 2013; EVANGELISTA *et al.*, 2015; BALDUSCO SILVA *et al.*, 2015; BEDOYA e DZUL, 2015; GIRARDI, MARTINS FILHO e CARASEK, 2017, CORRÊA, RÊGO e FEITOSA, 2018), apresentam absorção de água que variam de 1% a 16%. A alta variação nos valores de absorção de água pode ser explicada devido à grande variabilidade tanto em relação ao material de origem, quanto em relação ao processo de beneficiamento (ver item 2.1).

Em função dos prejuízos causados às propriedades dos materiais cimentícios, como a trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade, as normas e diretrizes limitam as taxas de absorção de água dos agregados reciclados. A ABNT NBR 15116:2004, por exemplo, limita a taxa de absorção de água dos agregados miúdos a no máximo 12% para os agregados reciclados de concreto (ARC) e 17% para os agregados reciclados mistos (ARM) (Tabela 2.1). Para os padrões japoneses, segundo Cabral (2007), o limite máximo de absorção de água das areias de ARM é de 13%.

Com o objetivo de melhorar trabalhabilidade das misturas com agregados reciclados, pesquisas têm estudado a possibilidade de usar os agregados reciclados também na condição pré-saturada, uma vez que quando os mesmos são adicionados à mistura na condição seca, uma parte considerável da água seria absorvida, vindo a influenciar negativamente em suas propriedades.

Contudo Poon, Shui e Lam (2004) explicam que, se por um lado, o uso do agregado reciclado na condição seca ocasiona perda de trabalhabilidade, por outro lado, ao utilizá-los nesta condição pode ocorrer um fortalecimento da zona de transição, pela absorção de água da mistura, o que proporciona a migração dos produtos de hidratação para dentro do agregado reciclado e, conseqüentemente, para a zona de transição.

Ratificando o posicionamento anterior, Miranda (2014) afirma que se o agregado reciclado for utilizado na condição seca, o concreto apresentará valores de exsudação bem menores quando comparados aos concretos de referência, o que levaria a uma melhora na resistência à compressão. Segundo Pacheco-Torgal *et al.* (2013), isso explicaria porque, em alguns estudos experimentais, obtêm-se resistências ainda maiores em concretos com agregados reciclados do que em concretos convencionais.

Ao contrário, segundo Miranda (2014), se o mesmo for previamente saturado, a exsudação será semelhante à dos concretos convencionais, ocasionando segundo Poon, Shui e Lam (2004), um enfraquecimento da zona de transição pela maior quantidade de água na região. Malta *et al.* (2014) também estudaram agregado miúdo reciclado e observaram uma redução na resistência à compressão das argamassas em todas as idades, independentemente do tratamento dado ao agregado reciclado (saturado ou seco) e para ambos os teores de substituição. Porém, os autores verificaram que a

saturação promoveu uma redução mais significativa na resistência à compressão das misturas, em todas as idades, e para todas as relações água/cimento testadas. Isso se dá porque a água compensada pode migrar para a pasta de cimento, aumentando ainda mais a relação água/cimento real em volta do agregado e, conseqüentemente, contribuir para a formação de uma estrutura de poros maiores (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013; MALTA *et al.*, 2014).

Por outro lado, o estudo de Leite e Monteiro (2016) concluiu que o uso do agregado reciclado na condição inicialmente seca não foi interessante porque, durante o estado seco, o agregado reciclado absorveu água e ar, liberando bolhas de ar no interior da matriz do concreto novo, o que provocou o surgimento de macroporos.

Com base nos resultados das pesquisas apresentadas, observa-se que ainda não há consenso no meio científico quanto à melhor condição de adição do agregado reciclado. Porém, independentemente do tratamento dado ao agregado a maior absorção de água por parte do agregado reciclado fará variar a relação água/cimento da nova matriz cimentícia. De qualquer forma, a ABNT°NBR°15116:2004 recomenda que se faça a compensação em massa de água (80% do teor de absorção de água do agregado reciclado).

### **2.3.2 Massa Específica e Massa Unitária**

Como a pasta de cimento é normalmente mais porosa e menos densa, sua presença é responsável não só pelas maiores taxas de absorção de água do agregado reciclado, como também, segundo Pacheco-Torgal *et al.* (2013), por sua menor massa específica e massa unitária.

Em relação à massa específica, vale a pena lembrar a diferença entre massa específica real e massa específica aparente. Para o cálculo da massa específica real, leva-se em consideração o volume real (volume de sólidos, excluindo os poros acessíveis). Logo os agregados reciclados apresentariam massa específica real praticamente igual à dos agregados naturais, uma vez que esta propriedade depende somente da composição química e não da porosidade (ANGULO e FIGUEIREDO, 2011).

Já para o cálculo da massa específica aparente, ou simplesmente massa específica, leva-se em consideração o volume aparente (incluindo os poros acessíveis), sendo que esta é menor nos agregados reciclados, devido à presença da pasta de cimento, (ANGULO e FIGUEIREDO, 2011).

Pesquisas sobre agregados miúdos reciclados (ULSEN *et al.* 2010; ULSEN *et al.*, 2013b; MIRANDA, 2014; KAHN *et al.*, 2014, SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014) ratificam esta afirmação, sugerindo que a presença de pasta de cimento, aderida ou não, seria responsável pelos menores valores de massa específica aparente dos agregados miúdos estudados por eles.

Já os menores valores de massa unitária se devem, segundo Mehta e Monteiro (2014), além da menor densidade e maior porosidade, ao formato irregular das partículas dos agregados reciclados, que podem não favorecer um bom arranjo das partículas (empacotamento). Cabral (2007) acrescenta que a massa unitária (empacotamento) e a massa específica vão variar com a granulometria do agregado reciclado e dependendo da maior ou menor presença de pasta de cimento.

Assim como em outras características, também a massa unitária e a massa específica aparente dos agregados reciclados são função do material de origem e do processo de beneficiamento. A respeito da influência do processo de beneficiamento, de acordo com Silva, De Brito e Dhir (2014), a massa específica dos agregados reciclados vai variar em função do número de britagens pelo qual o resíduo será submetido. Sendo que para o agregado graúdo, quanto maior o número de etapas de britagem, maior seria a massa específica, devido à remoção da argamassa aderida à superfície dos grãos. Efeito inverso, seria observado por Silva, De Brito e Dhir (2014) para as areias recicladas, neste caso, quanto maior o número de etapas de britagem, mais pasta de cimento se acumularia no material. Como a massa unitária depende também da densidade do material, é razoável pensar que esta característica também sofrerá influência do processo de beneficiamento.

Em relação à origem dos resíduos, Hansen (1992) concluiu que a origem do concreto interfere pouco na massa específica final dos agregados reciclados de concreto (ARC). O autor realizou um levantamento bibliográfico sobre os valores de massas específicas de argamassas antigas de diversos concretos com diferentes relações água/cimento e



constatou que as massas específicas destes concretos pouco variavam, ficavam em torno de  $2,0 \text{ g/cm}^3$ . Num estudo anterior, Hansen e Narud (1985), concluíram que apesar da pouca influência do material de origem na variação das massas específicas dos agregados reciclados de concreto (ARC), estas costumam ser de 5% a 10% menores que as dos agregados naturais. Neste sentido, alguns padrões internacionais têm utilizado esta característica como parâmetro avaliativo para aplicação de agregados reciclados.

A norma alemã DIN 4226-100, por exemplo, limita a presença da pasta de cimento na composição do ARC, através de sua massa específica. Já a *Danish Concrete Association* da Dinamarca, segundo Carrijo (2005), recomenda a aplicação de ARC, relacionando suas massas especificadas a sua capacidade de resistência máxima. A ABNT NBR 15116:2004 não faz menção a este parâmetro como requisito, mas autores como Leite (2001) e Malta *et al.* (2014), afirmam que a massa de agregado reciclado adicionado à mistura, deve ser corrigida em função de sua massa específica aparente.

Como a pasta de cimento aderida está presente tanto nos agregados reciclados de RC, quanto nos de RCD e ela pouco varia em termos de valores de massas específicas; é de se esperar que os valores dos agregados reciclados de diferentes origens (RCD e RC), apresentem faixa de variação de massas específicas bem semelhantes. Tal fato pode ser constatado através de pesquisas com areia (KATZ, 2002; EVANGELISTA e DE BRITO, 2010; EVANGELISTA e DE BRITO, 2014; EVANGELISTA *et al.*, 2015; GIRARDI; MARTINS FILHO e CARASEK, 2017) que encontraram massas específicas variando de  $1,9 \text{ g/cm}^3$  a  $2,6 \text{ g/cm}^3$  para areias de concreto e outras pesquisas (CORINALDESI, 2009; MALTA *et al.*, 2013; HWANG *et al.*, 2013; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; ULSEN *et al.*, 2014; GIRARDI; RODRIGUES e FUCALE; 2014; BEDOYA e DZUL, 2015; BALDUSCO DA SILVA *et al.*, 2015; MARTINS FILHO e CARASEK, 2017), encontraram massas específicas variando de  $1,9 \text{ g/cm}^3$  a  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , para areias de RCD. Observa-se variação de 27% entre o menor e o maior valor das massas específicas.

Como os valores de massa unitária dependem não só do parâmetro densidade do material, mas também da sua forma (empacotamento), um apanhado literário mostra que há diferenças entre as faixas de variação das areias recicladas de resíduo de concreto (RC) e as de resíduo de construção e demolição (RCD). Pesquisas sobre agregado miúdo de RC (KATZ, 2002; EVANGELISTA e DE BRITO, 2010; EVANGELISTA e DE BRITO,

2014; EVANGELISTA *et al.*, 2015; GIRARDI; MARTINS FILHO e CARASEK, 2017), apresentaram valores de massa unitária que variavam de 1.234Kg/m<sup>3</sup> a 1.330Kg/m<sup>3</sup>. Já pesquisas sobre agregados miúdos de concreto ou mistos de RCD (CORINALDESI, 2009; MALTA *et al.*, 2013; HWANG *et al.*, 2013; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; GIRARDI, MARTINS FILHO e CARASEK, 2017) obtiveram valores de massa unitária que variaram de 1.150 kg/m<sup>3</sup> a 1.460 kg/m<sup>3</sup>. Uma variação entre o menor e o maior valor de 7,5% para os agregados miúdos de RC e 21% para os agregados miúdos de RCD.

Por fim, Agrela *et al.* (2011) e Pacheco-Torgal *et al.* (2013), lembram que a absorção de água e a massa específica dos agregados reciclados são inter-relacionadas e mostram uma relação inversa (Figura 2.3). De Juan e Gutiérrez (2009) complementam afirmando que tal relação se justificaria, uma vez que ambas as grandezas incluem em suas determinações os volumes de vazios (poros) dos agregados.

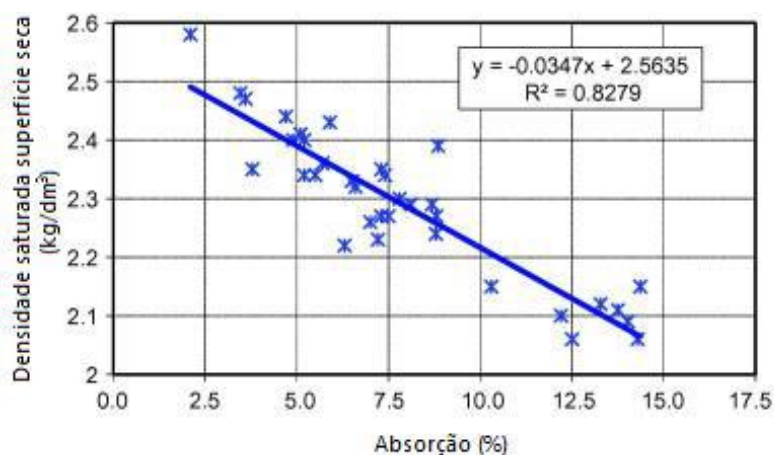


Figura 2.3 \_ Correlação entre a absorção e a densidade saturada superfície seca de agregados reciclados (AGRELA *et al.*, 2011)

### 2.3.3 Forma e Granulometria

De acordo com Pacheco-Torgal *et al.* (2013), a distribuição granulométrica dos agregados reciclados é diferente da dos agregados naturais, pois estes materiais possuem composição e dureza distintas. Segundo Angulo (2005), esta diferença muitas vezes dificulta o enquadramento destes materiais à curva granulométrica dos agregados convencionais. Com relação à forma, os agregados reciclados apresentam forma normalmente angulares, devido à grande quantidade de rochas britadas e textura rugosa, dada a presença de pasta de cimento aderida à sua superfície (SANTOS, 2016).

Segundo Ulsen *et al.* (2010) e Miranda (2014), dependendo da forma e da granulometria, os agregados reciclados apresentarão maiores quantidade de pasta de cimento aderida, sendo que quanto menor a granulometria do agregado reciclado, maior será a quantidade de pasta de cimento aderida ao mesmo (ver item 2.2.1).

Hansen e Narud (1983) afirmam que a forma e a granulometria do agregado são importantes para a trabalhabilidade da mistura, vindo a impactar, segundo Tam (2008) e Miranda (2014), na porosidade, na permeabilidade, na resistência, no grau de compactação e na durabilidade de concretos e argamassas. Partículas com formas mais arredondadas e granulometria contínua \_ que não apresentem grande deficiência ou excesso de qualquer dimensão de partícula \_ produzem misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Hansen e Narud (1983) afirmam ainda que as formas angulares e texturas rugosas dos agregados reciclados aumentariam a fricção interna, fazendo com que as misturas com agregado reciclado demandassem por maiores quantidades de pasta de cimento (cimento + água) para obter a mesma trabalhabilidade de uma mistura convencional. Se por um lado os agregados reciclados demandam por mais água, pois apresentam maior superfície específica (maior porosidade), por outro sua maior rugosidade melhoraria a aderência entre a nova matriz e o agregado reciclado, podendo impactar positivamente na resistência mecânica dos materiais confeccionados com estes materiais (LEITE, 2001; BUTTLER, 2003; RATO, 2006).

Em relação à granulometria, a dificuldade de enquadramento dos agregados reciclados dentro da curva granulométrica convencional, pode gerar problemas de trabalhabilidade da mistura, dificuldades na definição do traço para concretos confeccionados com estes agregados, além de desperdício de material (ANGULO, 2005). Ulsen *et al.* (2010) por exemplo, concluíram que as distribuições granulométricas dos RCD estudados, mostraram que seria necessário um segundo estágio de britagem para adequação do agregado reciclado graúdo à curva granulométrica. Os pesquisadores relataram que cerca de 50% da massa do RCD involuntariamente geraram agregado miúdo e não graúdo.

Já Gomes *et al.* (2015), observaram que as amostras de agregados miúdos reciclados de concreto utilizadas em seu trabalho, não se encaixaram à curva granulométrica padrão.

Os autores justificaram tal fato ao uso de diferentes processos de britagem. Logo o processo de beneficiamento assume um papel importante, no qual destaca-se a britagem como a etapa determinante, pois segundo Levy (2001), dependendo do tipo de resíduo, ao passarem por um determinado britador, este dará origem a agregados com formas e tamanhos totalmente diferentes.

Neste sentido, os tipos de britadores mais usados são os de mandíbula, impacto e o de martelos. O britador de mandíbula é muito usado na britagem primária, pois segundo Pavón (2010), as partículas geradas são mais angulares, necessitando de uma britagem secundária. Já o britador de impacto, segundo Angulo (2005), é usado tanto na britagem primária, como na secundária. E o britador de martelos, segundo Angulo (2000), Pavón (2010) e Ulsen (2011), é normalmente utilizado para britagem secundária e produz agregados de boa qualidade, pois promoveria maior eliminação da pasta de cimento aderida.

Por fim, Levy (2001) afirma que, produzir agregados reciclados bem graduados e limpos, não será suficiente para garantir a qualidade do processo de reciclagem. O material deverá ser adequado à finalidade específica para a qual se destina, ou seja, fisicamente, sua granulometria deverá enquadrar-se dentro de determinados limites e, quimicamente, só poderá conter níveis mínimos toleráveis de contaminação. Dessa forma, o autor coloca que o concreto ou argamassa produzidos poderão ser duráveis e haverá garantia da estabilidade das estruturas construídas.

### **2.3.4 Impurezas e Contaminantes**

A presença de impurezas e contaminantes nos agregados prejudica as propriedades dos materiais cimentícios, sendo assim, há consenso de que os mesmos devem ser eliminados do processo ou ter sua presença limitada. Em relação aos metais, pequenas quantidades de aço das armaduras, zinco e alumínio que possam estar contidos nos agregados reciclados, podem causar danos às misturas cimentícias, devido à sua oxidação. No entanto segundo Ulsen (2011), não é provável que quantidades significativas de aço ou outros metais permaneçam nos agregados reciclados, pois o aço costuma ser removido do processo na etapa de triagem, por separação magnética.

Em consonância com as diretrizes internacionais, a ABNT NBR 15116:2004 limita teores máximos para as impurezas e contaminantes: materiais não minerais, torrões de argila e materiais friáveis, cloretos e sulfatos (Tabela 2.1). Em relação à presença de materiais não minerais (madeira, plástico, betume, materiais não carbonizados, vidros e os vidrados cerâmicos) e matéria orgânica; a norma permite teores de no máximo 2% da massa dos agregados reciclados.

Em relação a presença de sulfatos e cloretos, países como Alemanha, Bélgica e Noruega limitam suas presenças a 1% da massa do agregado reciclado (ver item 2.1). No Brasil, a ABNT NBR 15116:2004 também limita a presença destes contaminantes à 1% (Tabela 2.1), recomendando que sua determinação seja realizada através do ensaio de bancada descrito pela ABNT NBR 9917:2009 - Agregados para concreto \_ determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis.

Quando os íons sulfato, também conhecidos como óxidos sulfúricos ( $\text{SO}_3$ ), reagem com o concreto hidratado, originam produtos capazes de expandir ou reduzir o concreto. De acordo com De Juan e Gutiérrez (2009), Agrela *et al* (2011) Silva, De Brito e Dhir (2014), os sulfatos presentes nos agregados miúdos reciclados, podem ser provenientes do gesso, que por sua vez está relacionado à camada de pasta aderida aos agregados. O gesso tem efeito negativo na qualidade do material, não só devido às expansões (reações de sulfato), mas também por que ser solúvel e apresenta baixa dureza e baixa densidade. Neste sentido, Pacheco-Torgal *et al.* (2013) recomendam o uso de cimento resistente a sulfatos em situações em que há suspeita de contaminação por gesso.

Mas *et al.* (2012) produziram argamassas com incorporação de 100% de agregados miúdos reciclados contaminados com sulfato. As argamassas foram confeccionadas com cimento convencional e cimentos resistentes a sulfato. Os resultados mostraram que conteúdos de sulfato ( $\text{SO}_3$ ) de até 2,9% não compromete a durabilidade das argamassas, independentemente do tipo de cimento utilizado, resistente a sulfato ou não. Silva, De Brito e Dhir (2014) complementam, afirmando que a presença deste contaminante deve ser discutido caso a caso, pois estabelecer um limite muito estreito para sua presença poderia, desnecessariamente, excluir o uso dos agregados reciclados da maioria das especificações.

Em relação à presença de cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), concretos contendo agregados reciclados contaminados com cloreto podem deteriorar-se mais rapidamente, devido à corrosão das armaduras. Segundo Silva, De Brito e Dhir (2014), a lavagem com água é uma maneira de reduzir a concentração desses constituintes nos agregados reciclados, porque como eles não estão ligados à microestrutura cimentícia, são susceptíveis à lixiviação e portanto, fáceis de serem removidos.

Conforme apresentado anteriormente, os agregados reciclados com teores de contaminantes e impurezas, além do limite permitido, podem causar prejuízos aos materiais cimentícios confeccionados com eles. Neste sentido, segundo Ulsen (2011), procedimentos de caracterização mais abrangentes, como análises mineralógicas e químicas, seriam necessários para maior controle da qualidade dos produtos gerados; aumentando a credibilidade dos agregados reciclados, podendo, inclusive, levar ao diagnóstico de novas aplicações ou inviabilizá-las.

Através da análise mineralógica, por exemplo, é possível detectar de forma indireta a contaminação por sulfato, através da presença da fase gipso (ver item 2.2). A análise química por sua vez, detectaria a presença de sulfatos ( $\text{SO}_3$ ) e cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), ou a presença dos óxidos de sódio e potássio ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ), responsáveis pela reação álcali-sílica no material endurecido. A presença destes e de outros contaminantes também pode ser detectada de forma precisa através de análise de cromatografia líquida.

## **2.4 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DAS MISTURAS CIMENTÍCIAS COM AGREGADOS RECICLADOS**

A seguir são apresentadas propriedades físico-mecânicas de misturas cimentícias, relacionando-as à influência das características dos agregados miúdos reciclados.

### **2.4.1 Trabalhabilidade**

A perda da trabalhabilidade é um dos pontos-chaves na produção das misturas cimentícias com agregados reciclados. Segundo Taylor (1997), como estes materiais são mais leves e porosos; ajustes de dosagem devem ser realizados, a fim de manter a trabalhabilidade das misturas com agregados reciclados. Para garantir não só a trabalhabilidade, mas também o volume da mistura a ser produzida, Leite (2001) e Malta *et al.* (2014), lembram que, além das massas de água, as massas de agregado reciclado também devem ser ajustadas (ver itens 2.3.1 e 2.3.2). Outras opções, segundo Pacheco-Torgal *et al.* (2013), seriam o uso de aditivos químicos (plastificantes ou superplastificantes), ou a pré-saturação do agregado reciclado (ver item 2.2.1).

Em relação ao ajuste de água da mistura, ele se faz necessário devido à maior absorção de água, por parte destes agregados (ver item 2.1.1). Agrela *et al.* (2011) afirmam que ao adicionar mais água à mistura, a quantidade de cimento deveria ser aumentada na mesma proporção para que a relação água/cimento permanecesse invariável. Porém, segundo Malta *et al.* (2014), não há um controle preciso da água livre e da água quimicamente combinada da matriz cimentícia. Logo, independentemente de se realizar ajuste de massa de água, ou de aumentar o conteúdo de cimento, a relação água/cimento em matrizes cimentícias com agregado reciclado vai variar.

Neste sentido, Malta *et al.* (2014) afirmam que determinar dosagens ótimas para misturas com agregados reciclados se torna um desafio, uma vez que não há como prever seu comportamento, devido à grande variabilidade destes materiais. Em relação ao ajuste de massa, ele é necessário pois a massa específica do agregado reciclado é normalmente menor que a massa específica do agregado natural, sendo que a simples substituição da massa do agregado natural pela massa do agregado reciclado resultaria em traços com volumes maiores de agregado (LEITE, 2001).

Caso a opção seja por não realizar o ajuste de água e apenas utilizar o superplastificante, Pacheco-Torgal *et al.* (2013) lembram que o mesmo seria eficaz apenas para agregados reciclados com uma absorção máxima de 9%. Em alguns casos, a opção seria o ajuste de água e o uso de superplastificante. Cabral *et. al.* (2008) por exemplo, trabalharam com agregados reciclados miúdos e realizaram os ajustes de massas de água e de volume de agregado reciclado. Os pesquisadores relataram que em alguns traços foi necessário adicionar também o aditivo superplastificante para que as misturas atingissem a trabalhabilidade desejada.

Ainda em relação ao uso de superplastificantes, existe a ideia de que seu uso pudesse de alguma forma vir a mascarar a real influência dos agregados reciclados nas misturas cimentícias. Sendo assim, com o objetivo de limitar as desvantagens associadas ao desempenho de concreto contendo agregados reciclados, Pereira, Evangelista e De Brito (2012) testaram a influência de dois tipos de superplastificantes em concreto com agregados reciclados miúdos. O estudo concluiu que os ganhos de resistência devido ao uso de superplastificantes estão intrinsecamente associados à redução da relação água/cimento. Os pesquisadores também constataram um decréscimo na eficiência dos superplastificantes, em termos de trabalhabilidade, com o aumento do teor de incorporação de agregado reciclado à mistura. Hansen e Narud (1983) já haviam constatado a não influência de aditivos superplastificantes, retardadores de pega e incorporadores de ar nas propriedades de concretos com agregados graúdos reciclados.

Em relação ao teor de agregado reciclado presente na mistura, pesquisas realizadas (KATZ, 2002; CORINALDESI, 2009; LEDESMA *et al.*, 2014; GUJEL, 2014; GAYARRE *et al.*, 2017) constataram uma redução da trabalhabilidade de misturas cimentícias com incorporação de agregados reciclados secos, sendo que esta redução se elevava com o aumento do teor de incorporação de agregado reciclado adicionado. Katz (2002), estudou a influência do teor de substituição de agregados miúdos reciclados na trabalhabilidade e resistência de concretos. O pesquisador notou uma queda de 20% na trabalhabilidade de concretos, com substituição de taxas acima de 25% de areia reciclada, ao mesmo tempo que concretos confeccionados com 100% de areia reciclada apresentaram uma redução de 25% na resistência à compressão, se comparados ao concreto de referência, para uma mesma relação água/cimento.



Isso acontece porque há um aumento da fricção interna das partículas, causadas pelas características de forma e textura (ver item 2.3.3) dos agregados reciclados, fazendo-se assim necessária uma maior quantidade de pasta para obter a mesma trabalhabilidade de uma mistura convencional (HANSEN e NARUD 1983). A textura rugosa dos agregados reciclados se deve à presença de pasta de cimento aderida à superfície do grão, fazendo aumentar também a absorção de água do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2014). No caso dos agregados miúdos reciclados, a pasta de cimento pode estar presente também na forma de finos, fazendo parte própria constituição da areia.

Por fim, as dosagens das misturas cimentícias, sejam elas convencionais ou com agregados reciclados, têm como intuito estabelecer quantidades ótimas de cimento, água, agregado natural, agregados reciclados, e aditivos, que permitam obter boa trabalhabilidade do concreto no estado fresco e alcançar um valor estipulado de resistência à compressão, a uma idade pré-determinada (GAYARRE, 2008).

#### **2.4.2 Resistência Mecânica**

O comportamento mecânico dos materiais cimentícios sofre influência direta dos agregados, pois os mesmos ocupam cerca de 70% a 75% do seu volume (CARRIJO, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Devido à presença da pasta de cimento (ver item 2.2), era de se esperar que concretos e argamassas produzidos com agregados reciclados fossem menos resistentes que os produzidos apenas com agregados naturais. Contudo, Pacheco-Torgal *et al.* (2013) afirmam que, os conteúdos de cimento hidratado e não hidratado \_ que podem chegar a 25% do peso da mistura \_ poderiam fazer aumentar a resistência de argamassas e concretos produzidos com areia reciclada. Ao passo que sua superfície mais rugosa, aumentaria o atrito entre as partículas, causando redistribuições de carga mesmo, segundo Silva, De Brito e Dhir (2014).

Neste sentido, pesquisas (LEITE, 2001; EVANGELISTA, DE BRITO, 2007; RODRIGUES e FUCALE, 2014; LEDESMA *et al.*, 2014, EVANGELISTA *et al.*, 2015, BALDUSCO DA SILVA *et al.* 2015; BEDOYA e DZUL, 2015; BOUDALI, 2016) têm comprovado a viabilidade técnica da aplicação dos agregados miúdos reciclados em concretos e argamassas.

Evangelista e De Brito (2007) por exemplo, testaram diferentes níveis de substituição de agregado miúdo de RC (20% a 100%) em concretos com diferentes condições de cura e observaram uma redução de 7,5% na resistência à compressão, para a substituição de 100%. Os pesquisadores concluíram, que a produção de concreto estrutural com agregado miúdo reciclado, não compromete as propriedades mecânicas do concreto para uma taxa de substituição de até 30%.

Evangelista *et al.* (2015) afirmaram que não foram constatados decréscimos na resistência à compressão pela substituição de agregados miúdos de RC em argamassas, quando não ultrapassavam o percentual de 30%, em massa. Porém, ressaltam que resultados obtidos em laboratório, com granulometria e britagem controladas, podem diferir do que se obtém em obra.

Fan *et al.* (2016) trabalharam com agregado miúdo de RC, variando a relação a/c (0,35 e 0,55) e os teores de substituição (0%, 50% e 100%). Os resultados mostraram que a areia reciclada pode ser utilizada em concreto estrutural, dependendo dos requisitos de resistência à compressão. Quando a resistência à compressão exigida é de 27,58 MPa, então o concreto reciclado com a/c = 0,35 poderia ser usado como material estrutural, independentemente da relação de substituição. No entanto, se a relação a/c = 0,55, os teores máximos de substituição seriam de 50%. Com uma resistência à compressão de 20,68 MPa, todas as taxas de substituição seriam aceitáveis.

Já Rodrigues e Fucale (2014), realizaram um estudo de dosagem experimental em concretos com teores de 0%, 50% e 100% de agregado miúdo de RCD. Os pesquisadores relataram que o teor de 50% de substituição foi o mais adequado, pois não causou prejuízos à resistência à compressão do concreto reciclado e manteve o mesmo consumo de cimento nas misturas.

No estudo de Ledesma *et al.* (2014), os pesquisadores usaram a análise de variância unidirecional para determinar a “taxa ótima de substituição” de agregado miúdo de RCD em argamassas. Os resultados provaram que uma taxa de substituição de até 40% seria a ideal.

Baldusco da Silva *et al.* (2015), trabalharam com substituição de 100% de agregado miúdo de RCD obtido por processo de jigagem. Os resultados comprovaram a eficiência do processo, uma vez que os concretos com 100% de agregado miúdo reciclado (submetido ao processo de jigagem), apresentaram resistências à compressão comparáveis aos do concreto de referência.

Bedoya e Dzul (2015) trabalharam com agregados miúdos obtidos através da recuperação de entulhos de obras de concretos e alvenaria. Foram testadas substituições de 25%, 50% e 100% em concretos estruturais. Os resultados mostraram que os concretos com substituições de 25% de agregado miúdo de RCD, apresentaram porosidade, resistências à compressão e à tração compatíveis aos concretos de referência.

Como observado acima, não há consenso quanto ao teor ideal de incorporação de agregados miúdos reciclados em misturas cimentícias, podendo estes teores variar de 0% até 100%. Tal aspecto se deve às inúmeras variantes relacionadas ao processo de fabricação, à origem dos resíduos e a sua heterogeneidade (ver item 2.1). Acredita-se que estas variantes façam com que países como Portugal, Espanha, Alemanha e Reino Unido, assumam uma postura mais conservadora, não permitindo o uso das areias recicladas em concretos ou argamassas (ver item 2.1).

De acordo com Pacheco-Torgal *et al.* (2013), como forma de garantir uma qualidade mínima para os materiais cimentícios, os padrões internacionais limitam a resistência à compressão do concreto de acordo com o teor de areia reciclada presente. O que faz sentido, uma vez que além da influência do agregado reciclado, a qualidade dos materiais cimentícios dependerá também da qualidade da nova matriz cimentícia. Pacheco-Torgal *et al.* (2013) lembram que quando a nova matriz cimentícia é menos resistente que o agregado reciclado este não terá grande influência na resistência mecânica do concreto e argamassa, pois a matriz será o elo mais frágil. Por outro lado, quando a matriz cimentícia é mais resistente que o agregado reciclado, este apresentará grande influência sobre a resistência do concreto ou da argamassa, uma vez que há grande chance que a ruptura aconteça no agregado (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013).

Em relação a resistência à tração, Buttler (2007) e De Juan e Gutierrez (2009), mostraram em seus trabalhos que ela tende a se igualar à dos concretos convencionais aos 90 dias.

Pacheco-Torgal *et al.* (2013) entendem que uma perda de até 6% da resistência mecânica para uma substituição de até 50% em concretos com menos de 40 MPa, não seria considerada uma redução importante, levando em conta que os concretos poderiam ser projetados usando quase a mesma quantidade de cimento dos concretos convencionais.

### **2.4.3 Massa Específica e Absorção de Água por Imersão**

Pesquisas têm mostrado que concretos e argamassas confeccionados com agregados reciclados costumam apresentar menor massa específica e maior taxa de absorção de água por imersão que os materiais cimentícios convencionais.

Baldusco da Silva *et al.* (2015) por exemplo, trabalharam com substituição de 100% de agregados miúdos de RCD em concretos. Os resultados mostraram que estes concretos apresentaram massas específicas no estado fresco 9% e 13% menores que os concretos de referência, e absorção de água em torno de 60% superior ao concreto de referência.

Como as características dos agregados influenciam nas propriedades dos materiais produzidos com eles, Dodds *et al.* (2017) afirmam que as características de massa específica e absorção de água dos agregados reciclados podem ser bons indicadores da qualidade dos mesmos, predizendo sobre propriedades como absorção de água por imersão, massa específica e resistência à compressão. Martínez *et al.* (2013), por exemplo, trabalharam com agregados miúdos de RCD de três diferentes construções em Cuba. Os pesquisadores observaram que esses agregados apresentaram massa específica em média 16% menor e absorção de água em média 59% maior que os agregados miúdos de referência. Os autores mostraram que tais características se refletiram nas propriedades das argamassas recicladas (com 100% de agregado miúdo reciclado) que apresentaram valores de absorção de água por imersão em média 34% superiores e valores de massas específicas em média 9,5% inferiores aos das argamassas de referência.

O estudo de Pedro, De Brito e Evangelista (2017) investigou os efeitos da substituição de dois agregados miúdos de RC em concreto estrutural. Uma das areias foi produzida em laboratório, sob condições controladas, e a outra era oriunda de uma planta de pré-moldados de concreto. Foram avaliadas, entre outras propriedades, a resistência à compressão e a absorção por imersão de concretos com 100% de agregado miúdo. Os

resultados mostraram que os concretos produzidos com a areia de laboratório apresentaram resistência à compressão, aos 28 dias, 6% maior; e absorção de água por imersão 5% menor que os concretos com areia da planta de pré-moldados. Contudo, em relação ao concreto de referência, os concretos reciclados foram inferiores, apresentando resistência à compressão em média 12,6% menor e absorção de água por imersão em média 62% maior.

A influência das características dos agregados reciclados sobre as propriedades: massa específica e a absorção de água, se intensificam com aumento da substituição do agregado convencional pelo reciclado dos concretos. Foi o que constataram, por exemplo, Evangelista e De Brito (2010). Os pesquisadores encontraram taxas de absorção de água por imersão 14,4% e 31,5% superiores às das argamassas de referência com substituições de 30% e 100% de agregado miúdo de RC, respectivamente.

Gayarre *et al.* (2017), trabalharam com substituições de 20%, 35%, 50%, 70% e 100% de agregado miúdo de RCD em argamassas. Os pesquisadores constataram que tanto os resultados de massa específica medidos no estado fresco, quanto os medidos no estado endurecido, apresentaram decréscimos lineares conforme o aumento do teor de agregados era incorporado à mistura, sendo que, as massas específicas das argamassas recicladas apresentaram valores que variavam em torno de 1,2% a 9,6% e 3,7% a 10% menores que as da argamassa de referência no estado fresco e endurecido, respectivamente.

Já Malta *et al.* (2013) trabalharam com agregado miúdo de RCD, e obtiveram valores de massa específica 6% menores que os do agregado de referência. Os resultados das argamassas recicladas produzidas com teores de substituição de 25% e 50% apresentaram valor de absorção de água por imersão em torno de 14,5% e 23,6% menores que os da argamassa de referência, respectivamente. O estudo também mostrou que as massas específicas das areias recicladas podem ter influenciado também na propriedade mecânica das argamassas, que apresentaram 26% e 32% a menos de resistência à compressão que a argamassa de referência, para os teores de substituição de 25% e 50%, respectivamente.

Estudos de Hansen, Narud (1985) e Evangelista *et al.* (2015), justificaram os menores valores de massas específicas dos concretos fabricados com agregados reciclados de seus estudos, pela maior propensão destes concretos ao ar incorporado (devido à maior

porosidade do agregado reciclado), o que de acordo com Braga, De Brito e Veiga (2012), poderia ser minimizado com a introdução de finos (inertes). Por outro lado, Gomes (2015) lembra que o fato dos materiais cimentícios com agregados reciclados normalmente apresentarem massas específicas inferiores aos convencionais poderia apontá-los como alternativa em peças onde o peso próprio da estrutura é um problema.

Zega e Di Maio (2011), trabalharam com um agregado miúdo de RC para produção de concretos com substituições de 20% e 30%. Os resultados mostraram que o agregado de RC apresentou absorção de água 88% maior que o de referência, apresentando também um elevado teor de finos, 95% maior. Apesar das diferenças expressivas entre as características do agregado de reciclado e o de referência, os concretos com 20% e 30% de areia reciclada apresentaram absorção de água por imersão apenas 8% e 11,5% menores que os concretos de referência. Eles também apresentaram resistências à compressão semelhantes aos do concreto de referência. Os autores justificam que os resultados se devem à menor relação a/c adotada nas misturas recicladas e aos menores teores de substituição. Sendo assim, o estudo mostra que além das características dos agregados reciclados, outras variáveis influenciam nas propriedades dos materiais produzidos com agregados reciclados como a dosagem e a porosidade, por exemplo.

#### **2.4.4 Porosidade**

De acordo com Rato (2006), a formação de poros resulta do excesso de água em relação à necessária para o processo de endurecimento, pois a água ao evaporar deixaria os espaços por ela ocupados. O autor afirma que a forma e a dimensão das partículas influenciam na estrutura porosa das argamassas. No caso dos agregados miúdos reciclados, além de apresentarem forma irregular e maior superfície específica – que normalmente demandam por maiores quantidades de água – eles também são mais absorventes; fatores que propiciariam a formação de uma estrutura mais porosa (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013). Neste sentido, Martínez *et al.* (2013) observaram que argamassas com 100% de agregado miúdo reciclado de RCD e com idade de 28 dias, apresentaram em média 24% a mais de volume total de poros que as argamassas de referência, ao mesmo tempo que absorviam em média 64% a mais de água que o agregado de referência.

Carrijo (2005) e Alderete *et al.* (2017), afirmam que além da qualidade do agregado reciclado, a qualidade da nova matriz cimentícia e da zona de transição influenciarão na estrutura porosa de concretos e argamassas, com agregado reciclado ou não. Contudo, a formação da nova matriz cimentícia também sofre influência do agregado reciclado, uma vez que o mesmo, sendo mais poroso, acarretaria aumento da permeabilidade do meio, facilitando o transporte de gases e fluidos pelo interior do material cimentício, refletindo na porosidade da matriz cimentícia (GAYARRE, 2008). Dodds *et al.* (2017) ratificam que os agregados reciclados com maior capacidade de absorver água podem reduzir a capacidade da nova pasta de cimento de aderir à sua superfície, vindo a prejudicar a qualidade da nova zona de transição. Segundo os autores, isso acontece devido à liberação de ar pelo agregado reciclado durante o início do processo de cura que criaria vazios adicionais à mistura.

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a estrutura porosa dos materiais cimentícios influenciaria em propriedades como a absorção, a massa específica, a permeabilidade e resistência mecânica. Sendo assim, segundo Carrijo (2005) e Alderete *et al.* (2017), as propriedades são diretamente influenciadas e controladas não só pelo número total de poros, mas também pelo tipo, pelo tamanho e pela continuidade dos poros presentes na pasta de cimento, nos agregados e na zona de transição, sejam as misturas convencionais ou não.

Segundo Gong *et al.* (2014), não há um consenso no meio científico em relação aos limites de dimensões dos poros. Sendo que para Rato (2006), estes variam em função daquilo que se quer avaliar. Segundo o autor é bastante aceita a classificação da DIN66.131 (1973), que classifica os poros de acordo com suas dimensões em macroporos ( $> 0,05 \mu\text{m}$ ), mesoporos ( $0,002 \mu\text{m}$  a  $0,05 \mu\text{m}$ ) e microporos ( $< 0,002 \mu\text{m}$ )

De acordo com Rato (2006), em argamassas e concretos, os poros capilares resultam do excesso de água de mistura e os poros grandes, da granulometria dos agregados e dos métodos de mistura e de compactação. De acordo com Mehta, Monteiro (2014) e Ho *et al.* (2018), os macroporos \_ normalmente interconectados \_ teriam mais influência na determinação da resistência e permeabilidade e os mesoporos, de acordo com Ho *et al.* (2018), influenciariam na estabilidade e durabilidade dos materiais cimentícios.

Cabral (2007) lembra que nos materiais cimentícios confeccionados com agregados reciclados as faixas de poros que prevalecem são as dos macroporos e mesoporos, sugerindo assim uma porosidade com maior tendência à absorção de água e lixiviação. Como concretos e argamassas com agregados reciclados costumam apresentar além de uma maior porosidade, uma estrutura porosa susceptível à percolação, uma alternativa para refinamento dos poros seria o uso dos materiais cimentícios suplementares (MCS). Alderete *et al.* (2017) lembra que quando os materiais cimentícios suplementares são usados, mudanças na estrutura dos poros ocorrem ao longo do tempo, levando a uma redução do volume de poros e consequentes modificações nas propriedades do material no estado fresco e no estado endurecido.

## **2.5 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES**

Os materiais cimentícios suplementares (MCS), segundo Wu e Ye (2017), seriam materiais alternativos, subprodutos da indústria ou de origem natural, utilizados em substituição parcial ao cimento ou como adição em concretos e argamassas de cimento Portland. Seu uso pode trazer melhoras à trabalhabilidade, à resistência do concreto à fissuração térmica, à expansão causada pela reação álcali-agregado e ao ataque por sulfato, aumentando sua durabilidade (PARIS *et al.*, 2016; HO *et al.*, 2018; CHENG *et al.*, 2018). Segundo Cheng *et al.* (2018), o metacaulin (produto da calcinação de argila de caulinita), por exemplo, quando substitui parcialmente o cimento, pode aumentar significativamente a durabilidade do concreto e reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Além de materiais tradicionais como cinzas volantes, escória de alto forno, sílica ativa e materiais argilosos, Paris *et al.* (2016) citam a utilização de resíduos não tradicionais, que também têm potencial para serem utilizados como adições ou substituições do cimento Portland. Seriam, por exemplo, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, a cinza de casca de arroz, as cinzas de biomassa de madeira residual e os finos dos resíduos de construção civil. No caso dos resíduos de construção, pesquisas têm mostrado bons resultados destes materiais como material de enchimento.

De acordo Paris *et al.* (2016), os materiais cimentícios suplementares geralmente são do tipo autocimentante ou pozolânico. Materiais autocimentantes reagem de maneira



semelhante ao cimento; numa reação hidráulica irreversível quando combinada com água. Já a pozolana é um material de composição siliciosa e, por isso, não tem propriedades cimentantes na presença de água. Segundo Taylor (1997), a reação pozolânica acontece quando um dos produtos de hidratação do cimento, o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), reage com a sílica para formar mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Ainda segundo Taylor (1997), a atividade pozolânica dentro de um sistema de cimento Portland é dependente do tamanho de partícula. Nesta perspectiva, Wu e Ye (2017) e Cheng *et al.* (2018) afirmam que não só a finura, mas também a área superficial resultarão em variações que poderão contribuir para diferenças consideráveis na taxa de hidratação, ganho de resistência, trabalhabilidade e durabilidade dos concretos e argamassas com adições pozolânicas.

Quanto mais fino e quanto maior a superfície específica do material, mais reativo ele é, sendo assim, para Somna *et al.* (2012), os materiais cimentícios suplementares deveriam ter finuras iguais ou inferiores às dos cimentos Portland; já para John, Cincotto e Gomes da Silva (2003), a finura ideal para pozolanas seria abaixo de  $15\mu\text{m}$ . Em relação à área superficial das frações pulverulentas, de acordo com John, Cincotto e Gomes da Silva (2003), elas devem ser maiores que  $3.000\text{ cm}^2/\text{g}$ .

Braga, De Brito e Veiga (2012) estudaram o efeito dos finos de resíduo de concreto nas propriedades de argamassas. Os finos substituíram a areia nas proporções de 5%, 10% e 15% das misturas. Segundo os autores, os finos foram os responsáveis por melhoras consideráveis nas resistências à tração e à compressão, à medida que a taxa de substituição aumentava. Braga, De Brito e Veiga (2012) justificam as melhoras mecânicas das argamassas ao feito filer, que teria preenchido alguns espaços vazios, e ao efeito hidráulico, devido à presença de compostos não hidratados de cimento. Segundo os pesquisadores, a substituição de areia por partículas finas, fez com que os diâmetros dos poros da argamassa diminuíssem, resultando em uma menor absorção de água por capilaridade.

Contudo, teores elevados de finos podem levar ao aumento de fissuração do concreto ou argamassa. Rosa (2013), por exemplo, estudou o efeito do teor de microfinos nas propriedades da argamassa de revestimento. O pesquisador observou que argamassas com

elevado teor de adição de finos (20% e 30%), em relação ao agregado miúdo, apresentavam maior área de fissuração, devido à maior retração causada, por sua vez, pela maior demanda por água. Por outro lado, o pesquisador relatou que com o aumento do teor de finos houve melhoras no empacotamento dos grãos.

Elaqra (2015) substituiu parte do cimento por fração pulverulenta de RCD em argamassas com agregado natural. O autor observou que as argamassas com presença de frações pulverulentas (finura menor que 4  $\mu\text{m}$ ) obtiveram resistência à compressão maior que 40 MPa, para substituições de até 20%, e valores de resistência à flexão superior a 60 MPa, para substituições de até 10%. Segundo o autor, os bons resultados mecânicos das argamassas podem dever-se ao efeito filler das frações pulverulentas, preenchendo os vazios da zona de transição, e ou à presença dos silicatos de dicalcio e tricálcio ( $\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{S}$ ) nos resíduos, que favoreceram o ganho de resistência das argamassas.

Galletto *et al.* (2017) avaliaram o índice de atividade pozolânica de resíduos de concreto. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização de calorimetria e atividade pozolânica nas argamassas. Os resultados não indicaram atividade pozolânica para o resíduo, que obteve um valor de índice de atividade pozolânica de 69%, enquanto que a ABNT NBR 12653:2015-Materiais pozolânicos-Requisitos exige no mínimo 90%.

Já pesquisas como a de Guillante *et al.* (2017), avaliam ainda a possibilidade de sinergia entre diferentes materiais com potencial pozolânico. Para tal, os pesquisadores estudaram isoladamente e de forma combinada a cinza de casca de arroz (CCA) e o resíduo de cerâmica vermelha, com presença de aluminatos (CRV). Os autores concluíram que a CCA isoladamente contribui na resistência à compressão, porém, seu uso pode ser crítico para a reação álcali-agregado. Já o resíduo de cerâmica vermelha com aluminatos, contribuem para a mitigação da reação álcali-agregado, no entanto, podem levar a um desenvolvimento mais lento da resistência à compressão. Quando combinados, os efeitos positivos de cada uma das pozolanas contribuíram para a melhoria das propriedades estudadas.

Por fim, Paris *et al.* (2016) afirmam que é consenso que a adição ou substituição de materiais cimentícios suplementares estáveis e em proporções corretas podem equilibrar

quimicamente o sistema, trazendo benefícios para a infra-estrutura construída, bem como para o meio ambiente.

## **2.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA**

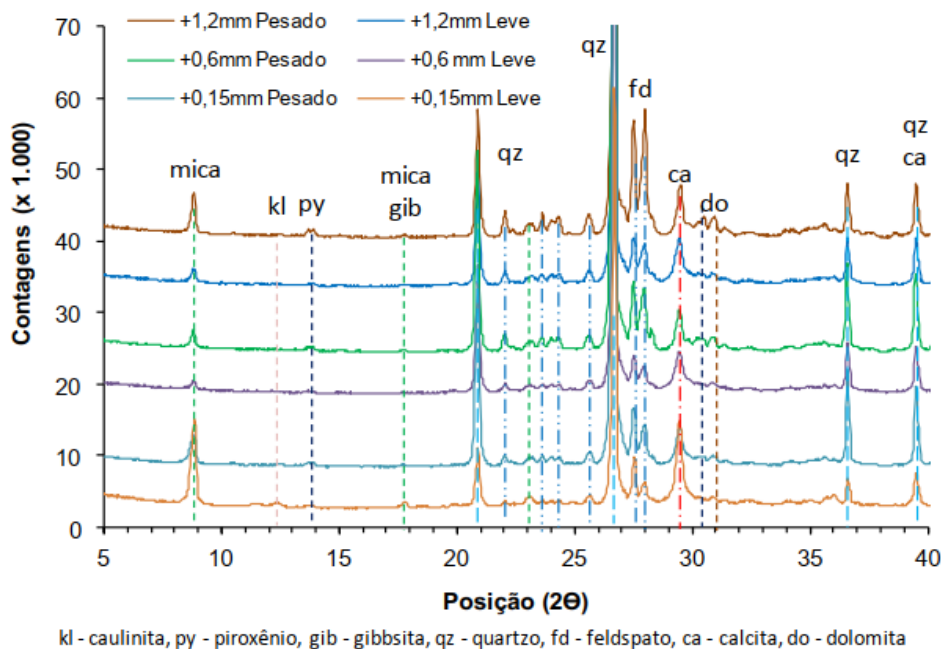
Denomina-se caracterização tecnológica aquela que engloba a aplicação de técnicas muitas vezes sofisticadas, que permitem conhecer sobre a natureza mineralógica, química e física de nível microestrutural de um material (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013). Para caracterização mineralógica é comum aplicar a técnica microestrutural qualitativa de Difração de Raios X (DRX), ao passo que a caracterização química é normalmente realizada aplicando-se a técnica quantitativa de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX). Características físicas do material como finura, superfície específica, estrutura porosa e morfologia, podem ser conhecidas através da aplicação das técnicas microestruturais como: Granulometria a Laser, Superfície Específica BET, Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A seguir faz-se uma descrição das técnicas citadas acima,

### **2.6.1 Difração de Raios-X (DRX) e Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)**

A técnica de Difração de Raios-X (DRX) representa o fenômeno de interação entre o feixe de Raios X incidente, e os elétrons dos átomos componentes de um material relacionado ao espalhamento coerente (os Raios X ao atingirem um material, espalham-se elasticamente, sem perda de energia, pelos elétrons de um átomo) (GOBBO, 2009).

Os Raios X são úteis para a análise de estruturas cristalinas, pois os comprimentos de onda com valores perto de 1 Å são da mesma ordem que o espaçamento dos planos atômicos em materiais cristalinos. Por meio dos planos de difração e de suas respectivas distâncias interplanares, é possível identificar características específicas e únicas de cada substância cristalina, da mesma forma do padrão difratográfico por ela gerado (GOBBO, 2009). Na Figura 2.4 a seguir, vê-se um padrão de DRX dos compostos de uma amostra de agregado reciclado miúdo por separação magnética, referente ao trabalho de Ulsen (2011).



**Figura 2.4 \_ Padrões DRX em produtos de separação magnética de agregados miúdos reciclados. (ULSEN 2011)**

No método do pó, comumente utilizado na análise de materiais policristalinos, a amostra é pulverizada e fixada em um porta amostra, sendo que cada partícula se comportaria como um cristal. O inconveniente da técnica, segundo Gobbo (2009), se deve à sobreposição de reflexões dos componentes, que dificultaria a análise de matérias com o número excessivo de compostos. Outra questão se refere à pulverização da amostra, que deve ser feita utilizando o graal de ágata: contudo, se a opção for o uso do moinho de esferas, corre-se o risco de destruir alguns cristalitos, devido à grande energia aplicada, mascarando os resultados (SCRIVENER SNELLINGS e LOTHENBACH, 2016).

Já a Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX) é uma técnica não destrutiva que permite a análise qualitativa e quantitativa da concentração de elementos químicos em uma ampla variedade de tipos de amostras. Segundo Gobbo (2009), a FRX é um processo de medida que, basicamente, emprega as propriedades dos átomos e moléculas de absorver e/ou emitir energia eletromagnética em uma das regiões do espectro eletromagnético. Um sistema de aquisição de dados, transforma os pulsos elétricos provenientes da etapa de detecção em espectro de fluorescência e então, a partir do espectro de fluorescência, são obtidas informações sobre a concentração e a presença ou

não de determinados elementos na amostra. Na Tabela 2.2, vê-se a composição química de três agregados de RCD do estudo de Ulsen *et al.* (2010).

**Tabela 2.2: Composição granuloquímicas dos finos da britagem primária e dos produtos da britagem secundária (ULSEN *et al.* 2010).**

|            | Produto                        | Itaquera cinza |      | Itaquera vermelho |      | Vinhedo vermelho |      |      |
|------------|--------------------------------|----------------|------|-------------------|------|------------------|------|------|
|            |                                | FBP            | PB   | FBP               | PB   | FBP              | PB   |      |
| Massa (%)  | Graúdo                         | 53,5           | 86,2 | 41,9              | 70,8 | 43,2             | 80,7 |      |
|            | Miúdo                          | 41,6           | 11,8 | 52,5              | 26,5 | 39,6             | 15,0 |      |
|            | Finos                          | 4,9            | 2,1  | 5,5               | 2,8  | 17,3             | 4,2  |      |
| Teores (%) | SiO <sub>2</sub>               | Graúdo         | 65,7 | 66,4              | 67,1 | 65,8             | 70,7 | 66,7 |
|            |                                | Miúdo          | 69,5 | 71,2              | 69,3 | 67,2             | 80,6 | 74,0 |
|            |                                | Finos          | 47,8 | 49,8              | 48,6 | 46,0             | 51,8 | 53,9 |
|            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Graúdo         | 9,2  | 8,7               | 10,5 | 8,8              | 10,3 | 10,7 |
|            |                                | Miúdo          | 7,6  | 6,0               | 8,4  | 7,6              | 6,2  | 7,7  |
|            |                                | Finos          | 11,1 | 8,4               | 13,5 | 8,8              | 18,0 | 13,1 |
|            | CaO                            | Graúdo         | 9,0  | 8,9               | 6,8  | 9,4              | 0,9  | 1,4  |
|            |                                | Miúdo          | 7,6  | 8,5               | 6,5  | 8,4              | 0,5  | 0,9  |
|            |                                | Finos          | 13,5 | 17,5              | 10,2 | 17,5             | 1,3  | 1,7  |
|            | PF                             | Graúdo         | 7,5  | 7,8               | 5,6  | 7,7              | 6,8  | 6,3  |
|            |                                | Miúdo          | 8,4  | 8,2               | 7,9  | 8,7              | 4,3  | 5,5  |
|            |                                | Finos          | 20,0 | 16,1              | 19,1 | 19,6             | 14,0 | 13,2 |

PF = perda ao fogo a 1050°C, Graúdo -25,4+4,8mm, Miúdo -4,8+0,15mm, Finos -0,15mm

Pesquisadores (ANGULO, 2005; ANGULO *et al.*, 2009; ULSEN *et al.*, 2010; ANGULO *et al.*, 2011; GONZALEZ *et al.*, 2011; EVANGELISTA *et al.* 2015), têm aplicado as técnicas de DRX e FRX para conhecer sobre a constituição mineralógica e química de resíduos de construção. As técnicas também são normalmente utilizadas para a caracterização de cimentos ou materiais com potencial para MCS. Através da interpretação de difratogramas, gerados no DRX, é possível saber sobre o nível de reatividade (grau de amorfismo) de determinado material, ou detectar a presença de fases cristalinas como a fase gipso, que indica a existência de pasta de cimento (DE JUAN e GUTIÉRREZ, 2009; AGRELA *et al.*, 2011). Através da composição química por FRX, é possível estimar o teor de pasta de cimento presente em uma amostra de areia reciclada, por exemplo, ou mesmo saber se ela apresenta traços de contaminação.

O estudo de Angulo *et al.* (2009) por exemplo, propôs uma metodologia de caracterização que permitiu quantificar com precisão o teor de pasta de cimento presente em agregados miúdos e seus pulverulentos. Para tal, três amostras representativas de agregados de RCD foram obtidos de duas usinas de reciclagem de São

Paulo. O pesquisador e seus colaboradores utilizaram, entre outras técnicas, a Difração de Raios X (DRX) e a Espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX). Os resultados mostraram que o agregado (mineral) e o material pulverulento representavam cerca de 50% das amostras, sendo que o agregado miúdo apresentava em média 19% de pasta de cimento e o material pulverulento 43%.

O trabalho de Figueiredo e Ulsen (2017), comparou dois métodos de cominuição normalmente utilizados para o beneficiamento de RCD, sendo eles o britador de mandíbula e o britador de impacto. Os produtos obtidos (frações de 9,5 mm a 0,15 mm) foram submetidos à caracterização química por FRX e mineralógica por DRX. Os resultados de FRX mostraram, que no intervalo entre 1,2 mm e 0,15 mm houve um aumento do teor de sílica enquanto que, nas frações abaixo de 0,15 mm, houve uma redução considerável no teor de sílica e aumento no conteúdo de CaO + PF. As análises de DRX confirmaram os resultados obtidos por FRX. Os resultados mostraram também que os agregados reciclados produzidos no britador de impacto e de mandíbula possuem características similares, sendo que o de impacto gera uma proporção de finos maior do que o de mandíbula.

O escopo do trabalho de Ulsen *et al.* (2013a) envolveu a caracterização tecnológica de areias recicladas de RCD. Por meio de separações de fases (minerais e outras), foram realizadas análises químicas por FRX, para determinação do teor de pasta de cimento. A composição mineralógica por DRX foi utilizada para confirmar os resultados obtidos na análise química. Os pesquisadores coletaram um total de quatro toneladas de material já submetido à britagem primária, e no laboratório estes materiais passaram pela britagem secundária e terciária. Através da aplicação das técnicas de separação por líquido denso e separação magnética, foi possível recuperar 80% e 60% da fração mineral das areias, respectivamente.

Evangelista *et al.* (2015) testaram como as diferentes aberturas das mandíbulas do britador poderiam gerar mais ou menos finos em agregados miúdos de RC. Os produtos gerados foram separados em frações (4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 µm, 250 µm, 125 µm e 63 µm) e suas mineralogias foram conhecidas através da técnica de DRX. Os difratogramas mostraram presença de calcita, quartzo, gipso, feldspato de potássio e feldspato e sódio em todas as frações, juntamente com quantidades de etringita e de

portlandita. A calcita foi a fase mais abundante em todas as amostras, sendo que o pico mais intenso foi o da fração de 125  $\mu\text{m}$ . Os autores associam os picos de calcita à pasta de cimento, porém não descartam que parte dela pode estar associada à presença de calcário da rocha original. O quartzo e o feldspato, que provêm da areia natural siliciosa, foram a segunda e terceira fases cristalinas mais presentes. As imagens do MEV, juntamente com os resultados do DRX, mostraram que as frações de menor tamanho apresentam alto teor de pasta de cimento e que as maiores frações granulométricas apresentam quantidades consideráveis da fase mineral.

O trabalho de Guillante *et al.* (2017), propôs o estudo em conjunto da cinza de casca de arroz (CCA) e do resíduo de cerâmica vermelha (RCV), com o objetivo de obter benefícios tanto no comportamento mecânico, quanto na durabilidade frente à reação álcali-agregado (RAA). As caracterizações mineralógicas e químicas do RCV e da CCA foram determinadas através das técnicas de DRX e FRX. Os resultados de FRX mostraram que a CCA é composta basicamente por sílica, e que o RCV, além de sílica, apresenta teor considerável de alumina e ferro. Já os resultados de DRX mostraram que tanto a CCA quanto RCV apresentaram picos cristalinos de sílica na forma de quartzo e cristobalita, sendo que o difratograma da CCA apresentou um halo de amorfismo entre os ângulos  $15^\circ$  e  $30^\circ$ . Os resultados mostraram que o uso combinado do CCA e do RCV apresentou efeitos positivos de cada uma das pozolanas. Os resultados de FRX ajudaram a justificar o comportamento dos materiais, pois o pesquisador e seu colaboradores acreditam que o efeito positivo do RC na mitigação da RAA esteja relacionado ao teor de alumina presente no mesmo, e que por ser a CCA composta basicamente por sílica, a mesma pode ter se aglomerado, passando a atuar como agregado reativo, reagindo com os álcalis do cimento e desencadeando a RAA.

Fröhlich, Kulakowski e De Abreu (2017) investigaram o uso de resíduo cerâmico vermelho (RCV) como Material Cimentante Suplementar (MCS) na produção de cimento tipo LC3, comparando-o com o metacaulim. A composição mineralógica das argilas foi determinada por DRX. Os difratogramas das argilas calcinadas, do metacaulim e do RCV, apresentaram picos cristalinos sílica em forma de quartzo. Contudo, o metacaulim apresentou claramente um halo de amorfismo, enquanto que o RCV apresentou apenas um pequeno deslocamento da linha de base na região de  $20^\circ 2\theta$ . Os resultados dos ensaios de pozolanicidade mostraram que o RCV possui potencial pozolânico e apesar de não

atingir a resistência mínima exigida o mesmo mostrou potencial para a produção de cimentos.

Em estudos com resíduos de construção, a caracterização mineralógica e química é importante para conhecer a história e as propriedades dos materiais originais, principalmente nos casos em que a origem dos resíduos não é conhecida. Isso, porque, dependendo da composição dos agregados, o desempenho do concreto pode ser comprometido, devido à vasta gama de ambientes e condições a que esses materiais foram expostos. (SILVA, DE BRITO e DHIR; 2014).

## **2.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS**

De acordo com Reed (2005), o microscópio possui sistemas de iluminação e vácuo que produzem feixes de elétrons de alta energia cinética, que ao incidir sobre uma amostra ultrafina (na espessura de nanômetro) fornece imagens planas, imensamente ampliadas, possuindo a capacidade de aumento útil de até um milhão de vezes (1.000.000 X). A imagem é projetada em um anteparo fluorescente e poderá ser redirecionada, captada por um sistema computadorizado.

O MEV produz imagens eletrônicas do tipo *Secondary Electrons* (SE), quando operando em alto vácuo, e *Backscattered Electron* (BSE), quando operando a baixo vácuo, e pode realizar análises pontuais qualitativas através do *Energy-Dispersive Spectrometry* (EDS). Os elétrons secundários proporcionam uma imagem de alta resolução, sendo mais utilizados em amostras fraturadas, as quais devem ser anteriormente metalizadas com carbono ou ouro. Já os elétrons retroespalhados (mais sensíveis à diferença em número atômico), são mais utilizados em amostras polidas. Utilizados em conjunto com o espectrômetro de dispersão de energia (EDS), é possível a obtenção do espectro inteiro de raios X (REED, 2005).

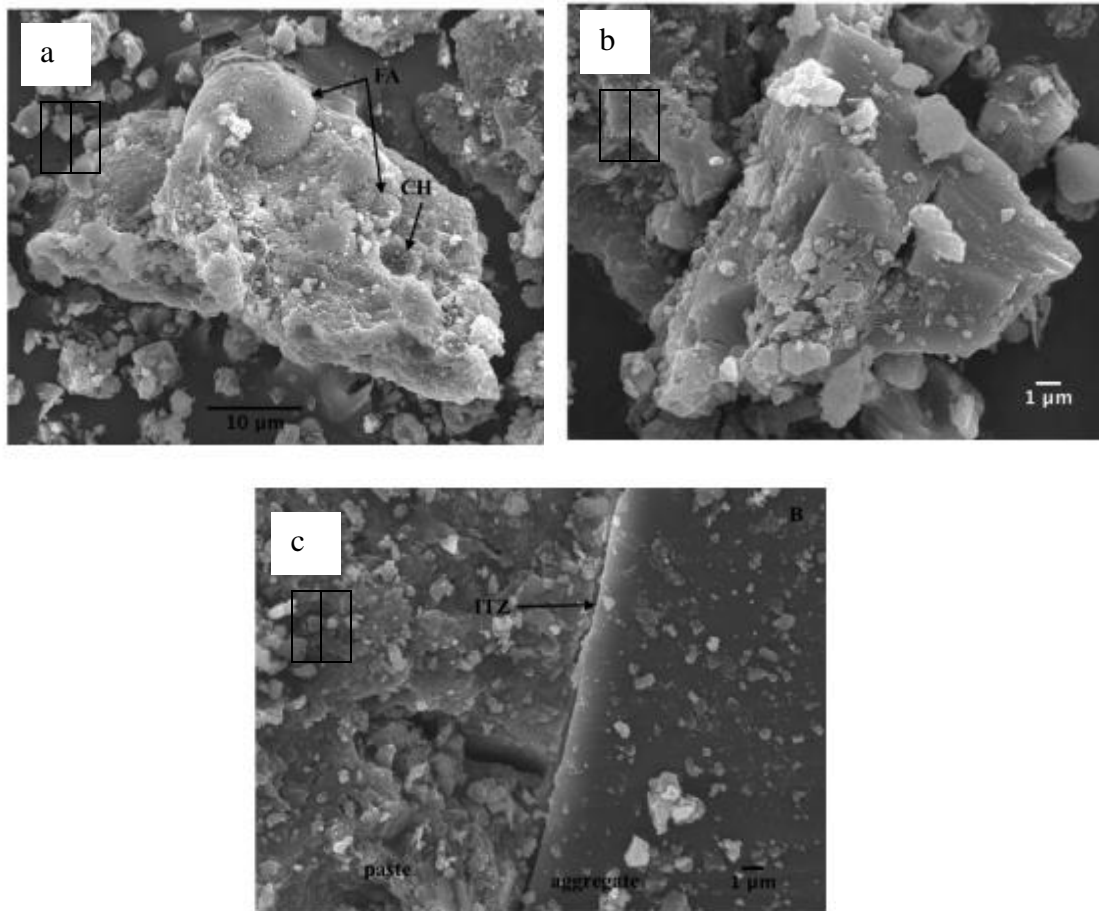
Isoladamente, a técnica é capaz de avaliar aspectos gerais da microestrutura de argamassas e concretos como: grãos de agregados, representados em tom de cinza mais escuro; pasta de cimento em hidratação, representados por grandes manchas de cor escura e grãos dos compostos de cimento alita e/ou belita, representados por pequenos pontos de



cor branca (TAM, GAO e TAM, 2005; LEITE e MONTEIRO, 2016; LI *et al.*, 2017; HO *et al.*, 2018).

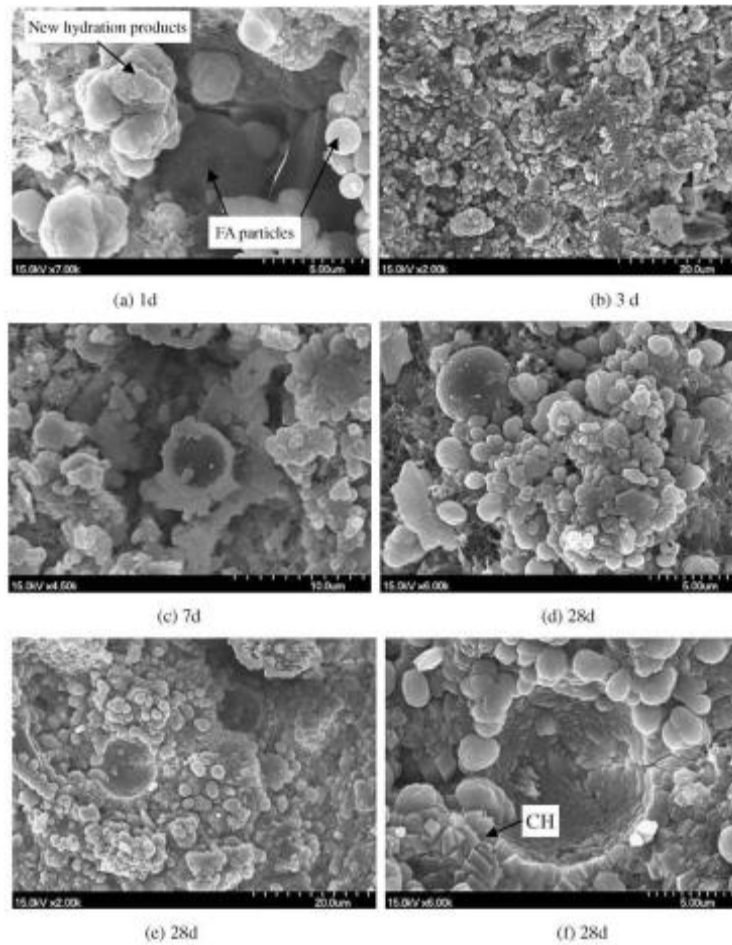
Em conjunto com outras técnicas, a microscopia eletrônica de varredura com EDS pode ajudar a confirmar a presença de determinado composto ou a formação de novos produtos, identificar vazios e a presença de compostos anidros de cimentos. Foram encontrados na literatura vários trabalhos que utilizam MEV no estudo de agregados reciclados, contudo, a maior parte trata de agregados graúdos reciclados. Poucos trabalhos abordam a morfologia ou a configuração dos agregados miúdos reciclados, tampouco a morfologia de microestruturas de materiais cimentícios com agregados miúdos reciclados. Neste sentido, serão apresentados a seguir trabalhos com MEV em agregados graúdos reciclados e alguns poucos sobre agregados miúdos reciclados.

Sobre os estudos que abordam a morfologia de agregados miúdos reciclados com o uso do MEV, destaca-se o trabalho de Evangelista *et al.* (2015), que através do MEV (EDS) identificou a presença de cristais de CH em partículas de areia reciclada de RC de 125 $\mu$ m (Figura 2.5a). As imagens corroboraram os resultados dos difratogramas de DRX realizados em amostras também de 125 $\mu$ m, que apontavam a presença em alta intensidade da fase cristalina calcita, ajudando, portanto, a confirmar a presença de pasta de cimento na fração da areia (Figura 2.5 a). A imagem da Figura 2.5a também mostra a presença de cestosferas de cinzas volantes não hidratadas. A imagem da Figura 2.5 b mostra uma partícula de areia de 125  $\mu$ m com forma irregular, aparentemente alta rugosidade e área superficial. Por fim, a Figura 2.5 c mostra uma partícula de areia de 1mm, onde se vê a pasta de cimento aderida, a ZT na interface e a fase mineral (Figura 2.5 c).



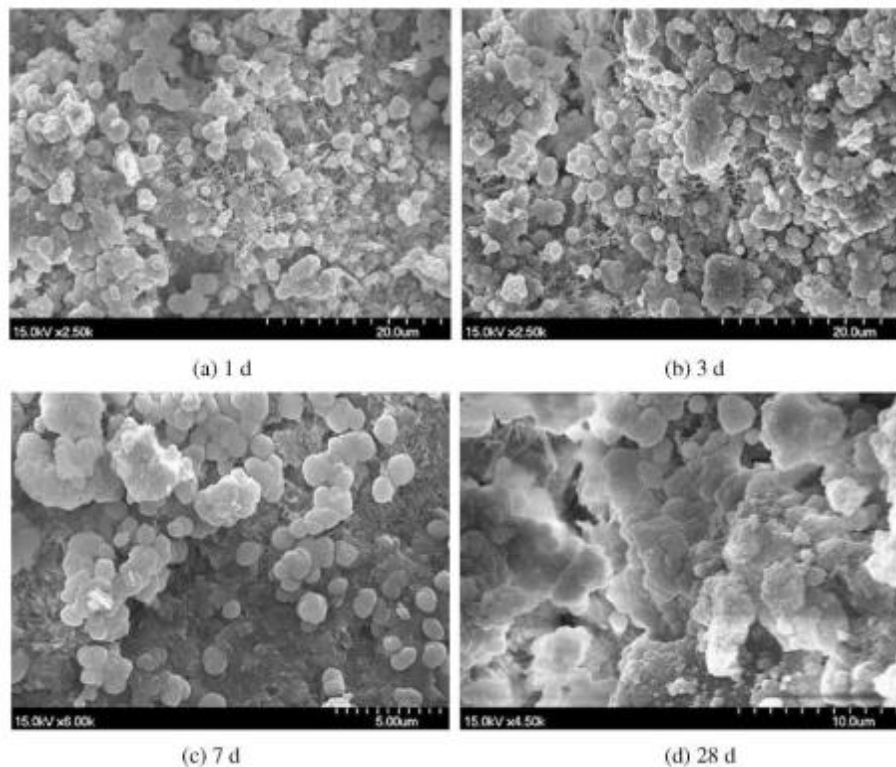
**Figura 2.5 \_** Imagens do MEV de partículas de areia de RC: (a) partícula de 125µm, com cristal de CH; (b) partícula de 125µm, grão de forma irregular e com partículas menores aderidas; (c) partícula de 1mm, da esquerda para direita vê-se a pasta de cimento aderida, ZT na interface e fase mineral. (EVANGELISTA *et al.*, 2015).

Um novo método de mistura tripla foi desenvolvido por Kong *et al.* (2010), com o intuito de revestir com material pozolânico a superfície dos agregados miúdos reciclados. O trabalho mostrou que a resistência à compressão e a resistência à penetração de íons de cloreto pode ser melhorada utilizando a mistura tripla, se comparada à mistura dupla. Por meio da observação de imagens do MEV, foi possível constatar que as partículas de cinza volante e escória de alto forno preenchem os poros do agregado reciclado e consomem o hidróxido de cálcio acumulado nos poros e na superfície da pasta de cimento aderida, formando novos produtos de hidratação e melhorando a microestrutura da zona de transição do novo material. As Figuras 2.7 a e b, mostram que a partículas de cinzas volantes aderidas à superfície reagiram com CH na antiga ZT para formar produtos de hidratação, já nas idades de 1 dia e 3 dias. As Figuras 2.7 c e d, mostram que grandes quantidades de produtos de hidratação se formaram aos 7 e 28 dias. As Figuras 2.7 e e f, mostram que ainda restaram partículas de CH aos 28 dias.



**Figura 2.6 \_ Superfície da areia coberta com cinza volante, mostrando o consumo do CH e a formação de novos produtos. (KONG *et al.*, 2010).**

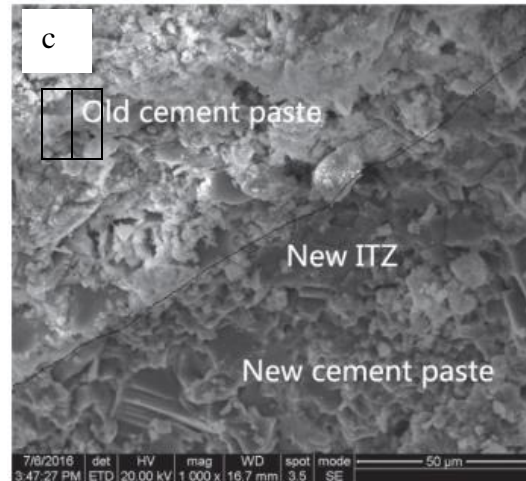
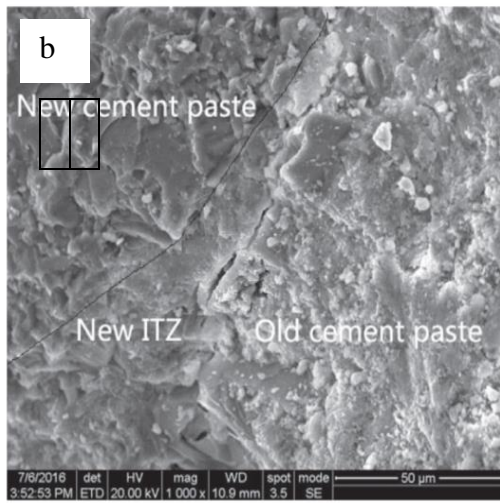
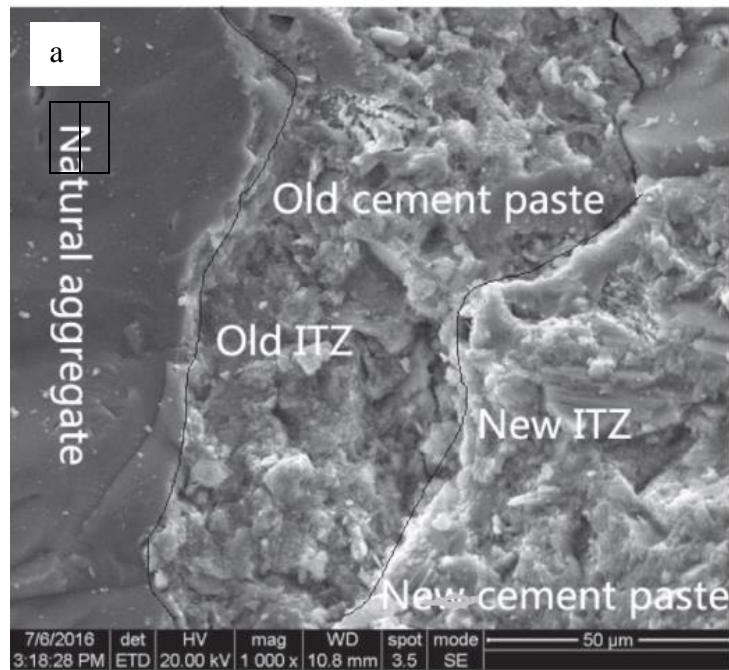
Ainda sobre o trabalho de Kong *et al.* (2010), a Figura 2.7 a seguir, mostra a microestrutura da antiga ZT do agregado reciclado usando escória de alto forno, as imagens não mostram presença de cristais de CH com 28 dias.



**Figura 2.7 \_ Microestrutura superficial da antiga ZT coberta com escória.  
(KONG *et al.*, 2010).**

Leite e Monteiro (2016) estudaram a influência da absorção de água do agregado graúdo de concreto reciclado na microestrutura do concreto. O teor de substituição foi de 50% e o agregado foi adicionado na condição seca. As análises no MEV permitiram a visualização da zona de transição formada entre o agregado reciclado e o novo concreto. Segundo os autores, esta ZT mostrou aproximadamente a mesma dimensão da ZT do concreto usado como referência. Além disso, os pesquisadores observaram que os concretos que utilizaram agregados reciclados, oriundos de concretos menos resistentes, apresentaram maior porosidade na nova zona de transição.

Li *et al.* (2017) utilizaram o MEV para analisar a morfologia das ZT e assim avaliar os efeitos da adição de nanopartículas (nanosílica e nanocalcário) na propagação de fissuras em concretos, com incorporação de agregados graúdos de RC. As imagens da microestrutura dos concretos, indicaram que os que continham nanopartículas apresentaram ZT mais densas e menos microfissuras que o concreto de referência. As imagens também mostraram que a nanosílica foi mais efetiva em melhorar as propriedades microestruturais dos concretos que o nanocalcário (Figura 2.8).



**Figura 2.8 \_ Microestrutura das novas e antigas ZT dos concretos com agregado reciclado: sem adição de nanopartículas (a), com adição de nanocalcário (b), com adição de nanosilica (c) (LI *et al.*, 2017).**

### 2.6.3 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

É considerada a técnica mais importante para determinação da porosidade dos materiais. O líquido utilizado para realização do ensaio é o mercúrio. Isto se justifica devido a suas propriedades, tais como: não molhar a maioria dos materiais, apresentar alta tensão superficial e baixa reatividade química. A partir dos dados experimentais é possível determinar vários parâmetros importantes na caracterização dos materiais porosos, como a distribuição de tamanho de poros, o volume total de poros, o diâmetro médio dos poros e a massa específica aparente e real.

Segundo Rato (2006), a metodologia baseia-se no princípio físico que determina que a pressão necessária para provocar a intrusão de um líquido que não molha, num capilar de secção circular, é inversamente proporcional ao diâmetro do capilar e diretamente proporcional à tensão superficial do líquido (referente à interface líquido-gás) e ao ângulo de contato do líquido (sendo que a superfície sólida é a que delimita o capilar). O diâmetro do poro  $D$  pode ser calculado pela Equação 2.1 de Washburn.

$$D = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{P} \quad (2.1)$$

Onde:

$\sigma$  é a tensão superficial do mercúrio [N/m];

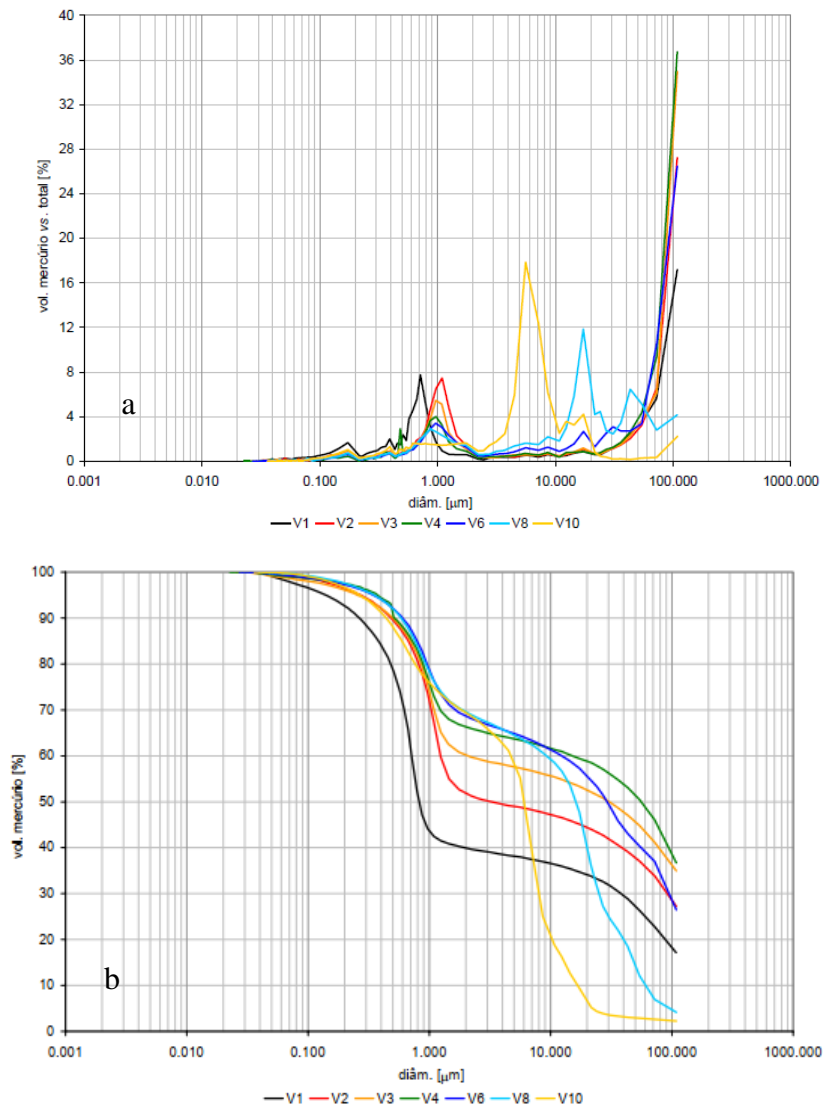
$\theta$  é o ângulo de contato entre o mercúrio e as paredes dos poros [°];

$P$  é a pressão exercida [Pa].

Ainda segundo Rato (2006), o método é aplicado para a medição de poros na faixa de 0,003  $\mu\text{m}$  a 400  $\mu\text{m}$ , sendo mais adequado na faixa de 0,1  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ . Os equipamentos disponíveis podem ser divididos em dois grandes tipos, de acordo com a pressão máxima exercida, chegando aos valores de 230 MPa e 400 MPa.

Entretanto, há pesquisas que apontam algumas falhas no método, como a suposição de que todos os poros são cilíndricos e o pressuposto de que os poros sejam independentes. Segundo Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), o mercúrio é intrudido na superfície da amostra e acessa a estrutura dos poros através de caminhos contínuos. Assim, a técnica PIM caracteriza apenas a porosidade conectada e determina o tamanho da entrada dos poros, em vez de seus tamanhos reais. Além disso, as altas pressões podem danificar a amostra, rompendo algumas estruturas e mascarando os resultados.

Nos gráficos das Figuras 2.10, vêem-se os resultados de um ensaio de PIM em uma argamassa, no qual observa-se a distribuição dos tamanhos dos poros da amostra.



**Figura 2.9 \_ Porosimetria por intrusão de mercúrio de areias monogranulares: (a) incremental, (b) acumulativa (RATO, 2006).**

Segundo Ying, Zhou; Xiao (2017) e Choi, Kim, Choi, (2017), a técnica é bastante útil no sentido de tentar desvendar como determinadas redes porosas influenciam no comportamento de argamassas com agregados reciclados. Sendo normalmente utilizada em conjunto com outras técnicas microestruturais com MEV, a PIM tem sido usada quando se deseja investigar mudanças na estrutura porosa dos materiais cimentícios em função da introdução de alguma outra variável como: temperatura, ambiente agressivo, ou adição de algum material à mistura como: nanopartículas, pozolanas ou fibras.

O projeto de pesquisa de Shi *et al.* (2017) por exemplo, avaliaram a reatividade alcalina de agregados de RC, por espectroscopia de impedância, taxa de expansão linear, módulo de elasticidade e porosimetria por intrusão de mercúrio. Quantidades de NaOH foram

adicionadas para ajustar o teor de álcali a 1,25% e diferentes percentagens de agregados reciclados foram adicionados aos concretos. Os resultados mostraram que a intensidade da reatividade alcalina do concreto mudou com a adição de diferentes teores de agregados reciclados alcalinos. As porosidades medidas dos concretos foram de 19,6%, 16,2% e 17,5%, para substituições de 100%, 80% e 60% respectivamente.

Li *et al.* (2017), avaliaram os efeitos da adição de nanopartículas (nanosílica e nanocalcário) na propagação de fissuras em concretos com incorporação de agregados graúdos de RC. A porosidade das zonas de transição (ZT) foram examinadas por Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM). Os resultados de porosidades totais das regiões das ZT mostraram que a porosidade total 12%, 8,82% e 9,06%, para os concretos sem adição de nanopartículas, com nanosílica e com nanocalcário, respectivamente. Além disso, o concreto sem adição de nanopartículas apresentou 40,4% dos poros com diâmetro maior que 1000 nm, enquanto os concretos com adição de nanosílica e com nanocalcário, apresentaram 8,4% e 13,3%, respectivamente. Os resultados de resistência mecânica e de absorção de água corroboraram com os resultados do PIM.

Ying, Zhou e Xiao (2017) estudaram o efeito da adição de nanopartículas de efeito fíler ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$ ) em argamassas com agregados miúdos reciclados. As nanopartículas foram adicionadas nas proporções de 1%, 2% e 3% em relação à massa do cimento. Aplicando as técnicas PIM e MEV, os estudiosos observaram o refinamento da estrutura de poros das argamassas através da diminuição do volume de poros capilares e da densificação da ZT. Os resultados do PIM mostraram que a proporção de adição mais eficiente foi de 2%, com tamanhos de poros mais prováveis de 17 nm e 19 nm para nano- $\text{TiO}_2$  e nano- $\text{SiO}_2$  respectivamente.

No estudo de Ho *et al.* (2018), os autores revestiram areia reciclada de RC com PVA, cinzas volantes e escória de alto forno, substituindo 25% de agregado natural pela areia reciclada revestida para fabricação de concretos. A porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizada em amostras de concretos contendo areia reciclada revestida nas idades de 7 dias e 28 dias. Os resultados do PIM mostraram que os concretos revestidos com PVA obtiveram menor porosidade aos 7 dias. Os pesquisadores acreditam que o PVA formou um filme de polímero sobre a superfície dos agregados, que fez reduzir a porosidade do concreto. No entanto, após este período, houve gradual corrosão do PVA pelo ambiente



alcalino, o que levou ao aumento de porosidade do concreto aos 28 dias. Os concretos revestimentos de cinzas volantes não apresentaram diminuição significativa da porosidade em nenhuma das idades estudadas. Já os concretos que continham areia reciclada revestida com escória de alto forno, apesar de apresentarem aos 7 dias estrutura porosa menos refinada que os concretos com PVA, alcançaram os melhores resultados aos 28 dias.

Poon, Shui e Lam (2004) estudaram dois agregados reciclados de concreto de diferentes procedências. Um teve como material de origem, resíduos de concretos de resistência normal (CN), e o outro resíduos de concreto de alto desempenho (CAD). As análises de PIM revelaram que os agregados reciclados de resistência normal e de alto desempenho apresentavam volume de poros total de 16,81% e 7,86%, respectivamente, enquanto o agregado natural, usado como referência apresentava volume total de poros de 1,6%. As maiores porosidades de agregados reciclados foram atribuídas à pasta de cimento aderida. O concreto referência obteve resistência à compressão superior à dos concretos com agregados reciclados aos 28 dias. Contudo, aos 90 dias os concretos preparados com agregados de concreto de alto desempenho alcançaram valor de resistência à compressão semelhante ao do concreto de referência, enquanto que o concreto com agregados de resistência normal, apresentava resistência 16% menor que o de referência. Os resultados do estudo são explicados pelas diferenças de porosidade dos dois agregados reciclados e possíveis interações entre os mesmos e a pasta de cimento.

#### **2.6.4 Granulometria a Laser e Superfície Específica BET**

O método de granulometria a laser é padronizado pela Norma Internacional ISO 13320:2009, *Particle size analysis – laser diffraction methods*. De acordo com Arvaniti *et al.* (2014), dois métodos são usados: o seco e o úmido, dependendo da natureza do meio dispersante, e requerem o conhecimento das propriedades ópticas (índice de refração e componente imaginário) tanto da amostra a ser medida, quanto do dispersante.

De acordo com Manzano (2016), a granulometria a laser utiliza a teoria Mie de espalhamento da luz para calcular a distribuição de tamanho de partículas, com base no modelo esfera de volume equivalente. O autor afirma que o granulômetro a laser representa uma ferramenta confiável e precisa para a análise granulométrica, e que em

seu estudo, os desvios foram menores que 1%. A amostra normalmente tem uma massa aproximada de 5,0g e deve ser inserida juntamente com um veículo condutor, que pode ser álcool ou xilol. Os sinais são enviados para o software e assim constrói-se a curva dos resultados do ensaio.

A fim de evitar a aglomeração dos finos, a amostra deve ser anteriormente preparada. Fröhlich, Kulakowski e De Abreu (2017) por exemplo, prepararam as argilas de seu estudo submergindo-as em hexametáfosfato por 24 horas na sequência as mesmas foram levadas a um ultrassom externo (100 W) para a dispersão das partículas durante 5 minutos e, por fim, ao ultrassom interno do analisador de partículas (40 W) por mais 3300 segundos.

Para medição de área superficial específica de um material, uma das técnicas utilizadas é a Superfície Específica, BET. O método BET é padronizado pela norma ISO 9277:2010, *Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method*, que, de acordo com Quantachrome (2017), utiliza a teoria matemática de Adsorção Multimolecular como base. A teoria matemática descreve a adsorção física de moléculas de um gás inerte, normalmente o nitrogênio, sobre a superfície externa e interna de todos os poros abertos de um material. Há, portanto, poros que são menores que o diâmetro do nitrogênio e neste caso são considerados fechados.

De acordo com Arvaniti *et al.* (2014), o método requer o pré-condicionamento das amostras em uma determinada temperatura no fluxo de hélio ou nitrogênio para minimizar as interferências nas medições devido a gases e vapores que podem ser fisicamente adsorvidos na superfície das partículas.

A granulometria a laser e o BET são normalmente utilizados por estudiosos que pretendem testar o potencial de materiais para serem usados como materiais cimentícios suplementares (MCS) ou simplesmente como material de enchimento. Sendo assim, conhecer a finura e a superfície específica do material é parte essencial (ver item 2.5).

Fröhlich, Kulakowski e De Abreu (2017) por exemplo, investigaram o uso de resíduo cerâmico vermelho (RCV) como MCS na produção de cimento, comparando-o com o metacaulim. Os resultados de granulometria a laser mostraram que o RCV apresenta uma

distribuição granulométrica de partículas menores que a do metacaulim, corroborando com os resultados dos ensaios de índice de atividade pozolânica (IAP), que mostraram que o RCV apresentou IAP de 125%, enquanto que o IAP do metacaulin foi de 110%, sendo que os dois materiais apresentaram potencial pozolânico satisfatório em relação à pozolanidade estabelecida pela norma brasileira (90%).

O objetivo do trabalho de Lavat, Trezza e Poggi (2009) foi estudar a reciclagem dos resíduos de RCD (concretos + cerâmicos), na fabricação de cimentos com adições. A granulometria a laser e o método BET foram utilizados na caracterização dos resíduos. A sobreposição das curvas granulométricas do cimento de referência e dos resíduos, mostrou que as faixas dos diâmetros das partículas dos resíduos estão dentro do mesmo intervalo da granulometria do cimento. Contudo, o laser detectou um número significativo de partículas acima de 44  $\mu\text{m}$ . A fim de atingir a granulometria necessária para aplicações pozolânicas, os pós foram peneirados através de uma malha 325 e a superfície específica foi de 5,6  $\text{m}^2/\text{g}$ . Diferentes formulações de misturas de cimento com resíduo foram preparadas com incorporação de 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de resíduos e na sequência foram realizados testes de consumo pozolânico. Os resultados confirmaram o potencial desses resíduos para produzir cimento.

Boudali *et al.* (2016) estudaram o desempenho de concretos auto adensáveis expostos a diferentes ambientes com presença de sulfatos. Foram produzidos concretos auto adensáveis com incorporação de areia reciclada de RC e seus finos; e também concretos auto adensáveis apenas com areia e pozolanas naturais. A granulometria a laser e o método BET foram utilizados para caracterizar a pozolana natural utilizada na pesquisa. A pozolana natural, composta principalmente de sílica e alumina (mais de 60%), apresentou um tamanho de partícula inferior a 80  $\mu\text{m}$ , resultando numa área superficial específica de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$ . O estudo monitorou a resistência à compressão dos concretos e o MEV (EDS) foi utilizado para identificar a formação de novos produtos. A pesquisa concluiu que as misturas com incorporação de areia e finos de RC apresentaram melhor desempenho que as misturas com agregados e pozolana naturais. A substituição de até 40% de areia e finos de RC além de não afetar a resistência a compressão do concreto, melhorou a microestrutura através da sua densificação, atuando como locais de nucleação para novos produtos de hidratação.

Já pesquisas como a de Guillante *et al.* (2017), avaliam a possibilidade de sinergia entre diferentes materiais com potencial pozolânico. Os pesquisadores estudaram isoladamente e de forma combinada a cinza de casca de arroz (CCA) e o resíduo de cerâmica vermelha com presença de aluminatos (RCV), com teor de substituição de 10%. Os resultados de granulometria a laser mostraram que o cimento, a CCA e o RCV apresentaram diâmetro médio de 17,07  $\mu\text{m}$ , 9,38  $\mu\text{m}$  e 53,36  $\mu\text{m}$  respectivamente. A Figura 2.10 apresenta as curvas granulométricas do cimento, da CCA e do RCV. Enquanto que as áreas superficiais específicas do cimento, da CCA e do RCV foram de 4.540  $\text{cm}^2/\text{g}$ , 11.517  $\text{cm}^2/\text{g}$  e 40.463  $\text{cm}^2/\text{g}$ , respectivamente. Como o RCV apresentou diâmetro médio de partículas elevado, não era de se esperar que ele apresentasse superfície específica cerca de 3,5 vezes superior à da CCA. Contudo, os autores justificam a elevada área superficial do RCV à sua superfície irregular. Os autores concluíram que a CCA isoladamente contribui para a resistência à compressão, porém, seu uso pode ser crítico para a reação álcali-agregado. Já o resíduo de cerâmica vermelha com aluminatos contribui para a mitigação da reação álcali-agregado; no entanto, pode levar a um desenvolvimento mais lento da resistência à compressão. Quando combinados, os efeitos positivos de cada uma das pozolanas contribuíram para a melhoria das propriedades estudadas.

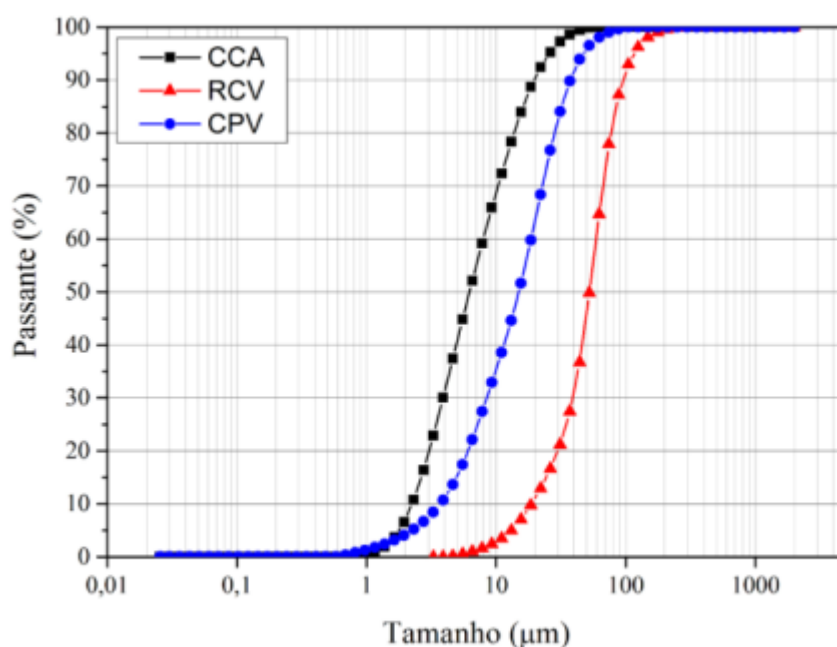


Figura 2.10 – Distribuição granulométrica do cimento CCA e RCV (GUILLANTE *et al.*, 2017)

## 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DE LITERATURA

Como visto nesse capítulo, a ABNT NBR 15116:2004 apresenta-se de forma geral coerente com os padrões internacionais, ao mesmo tempo que assume uma postura contemporânea ao permitir o uso dos agregados miúdos reciclados em concretos e argamassas. A necessidade de estabelecer referências de valores para uso dos agregados reciclados é importante, uma vez que estes apresentam alta heterogeneidade e algumas características inferiores às dos agregados naturais; ao mesmo tempo, a criação de regras e especificações para uso de agregados reciclados de diferentes origens e granulometrias podem ser vistas como um incentivo, desmistificando seu uso.

A revisão de literatura também mostrou que algumas características são intrínsecas aos agregados reciclados e que estas características influenciam nas propriedades mecânicas e microestruturais das argamassas e concretos confeccionados com estes materiais. Concluiu-se que a pasta de cimento endurecida faz aumentar a taxa de absorção de água do agregado reciclado, ao mesmo tempo em que faz diminuir sua massa específica. A maior porosidade deste agregado, sua forma angular e textura rugosa fazem aumentar o consumo da água de amassamento e da quantidade de pasta de cimento necessária para cobri-los. Estas características fazem com que a mistura se torne mais consistente, o que pode levar a uma menor qualidade das argamassas e concretos fabricados com estes materiais. Contudo, diversas pesquisas mostraram que há viabilidade no uso de agregados reciclados, desde que características como absorção de água e massa específica sejam conhecidas e os devidos ajustes de dosagem sejam realizados.

As observações do item sobre a pasta de cimento permitem concluir que os agregados miúdos reciclados apresentam maior teor de pasta de cimento que os agregados graúdos reciclados; que o processo de beneficiamento influencia no teor de pasta de cimento aderida ao agregado; e que é possível estimar sua presença através de caracterizações químicas e mineralógicas. Pelo exame de alguns trabalhos que abordam a microestrutura de materiais cimentícios com agregados reciclados, foi possível esclarecer alguns aspectos a respeito das zonas de transição desses agregados.

Foram também abordadas as potencialidades de aplicação dos resíduos de construção, como materiais cimentícios suplementares ou como materiais de enchimento. Contudo,

para que esses materiais se tornem mais reativos ou apresentem capacidade de refinar poros, os mesmos devem apresentar granulometria e área superficial adequadas.

A revisão de literatura ainda apresentou uma abordagem sobre algumas técnicas de caracterização tecnológica, descrevendo seus métodos e equipamentos, apresentando resultados de pesquisas e mostrando a importância da compreensão da relação entre a microestrutura e as propriedades dos materiais.

### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Neste capítulo são expostos os procedimentos metodológicos que foram executados na pesquisa, com a descrição dos materiais e métodos que foram empregados, com o intuito de atender aos objetivos do trabalho. A pesquisa foi dividida assim:

#### **Parte 1: Caracterização das Areias Recicladas**

A Parte 1 do trabalho buscou investigar possíveis diferenças nas características de frações granulométricas de areias recicladas, que pudessem contribuir no sentido de avançar sobre as possibilidades de aplicação de frações específicas, em argamassas e concretos. Sendo assim, o trabalho propôs conhecer sistemicamente cada uma das frações granulométricas de uma areia originária de usina de RCD e outra areia processada em laboratório a partir de RC de corpos de prova de controle de qualidade de uma concreteira.

Com o intuito de atender aos objetivos colocados acima, realizaram-se – nas frações granulométricas da areia normal de referência (AN) e nas frações granulométricas das areias recicladas – ensaios de caracterização física, análises visuais e morfológicas, além das caracterizações mineralógica e química. A fração pulverulenta (material oriundo do processo de peneiramento das areias) também passou por estes mesmos ensaios, exceto pela análise visual; contudo, tais resultados serão abordados na Parte 4 do trabalho.

#### **Parte 2: Avaliação do Comportamento Físico-mecânico das Argamassas Recicladas**

Com o objetivo de avaliar as influências das frações granulométricas das areias recicladas no comportamento físico-mecânicas de argamassas, propôs-se a realização de ensaios em argamassas padrão, compostas com 100% de areia normal (AN), e em argamassas recicladas, compostas por frações granulométricas das areias recicladas, em substituição às frações granulométricas da areia da normal, nas proporções de 25% e 100%.

### **Parte 3: Análises Microestruturais das Argamassas Recicladas**

Com o intuito de conhecer sobre a microestrutura de argamassas recicladas, propôs-se a realização de análises microestruturais em amostras de argamassas padrão e de argamassas recicladas (com 100% de areia reciclada). Análises via MEV (EDS) tiveram o objetivo de investigar sobre a formação das fases (antiga zona de transição e nova zona de transição), além de conhecer aspectos gerais das configurações das argamassas analisadas. As estruturas porosas das argamassas recicladas também foram investigadas por meio de análises via PIM.

### **Parte 4: Estudo das Frações Pulverulentas**

A última parte do trabalho propôs o estudo das frações pulverulentas (FP1 e FP2) através de ensaios e análises abordados na Parte 1 do trabalho. As argamassas que continham estas frações pulverulentas, também chamadas de “argamassas recicladas”, foram submetidas ao teste de Índice de Atividade Pozolânica (IAP). A porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), foi utilizada com o intuito de investigar se os materiais pulverulentos provocavam mudanças nas estruturas porosas das argamassas recicladas.

A Figura 3.1, a seguir, apresenta o organograma do trabalho, no qual são destacadas as partes e as etapas da pesquisa, assim como os ensaios e as técnicas utilizadas.



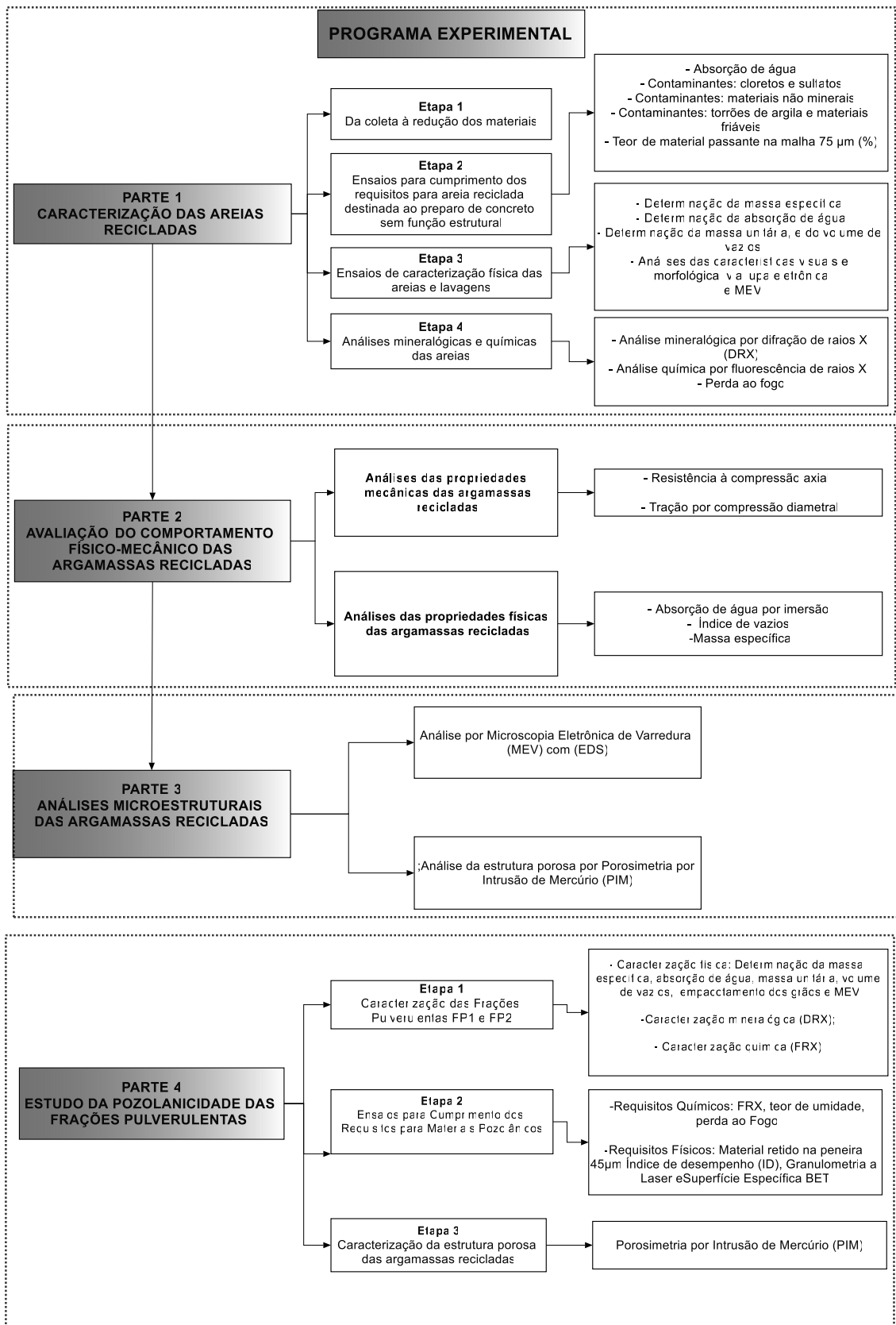


Figura 3.1 \_ Organograma com o Programa Experimental.

### **3.1 Parte 1: CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS RECICLADAS**

A seguir apresenta-se descrição das etapas da Parte 1 do trabalho, conforme apresentado no organograma (Figura 3.1).

#### **3.1.1 1º Etapa: Da coleta à Redução dos Materiais**

Toda esta etapa foi realizada com base nas normas brasileiras: ABNT NBR NM 26:2009 – Agregados – Amostragem; ABNT NBR 10.007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos e ABNT NBR NM 27:2001 – Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório, “Método A” e “Método B”. Já a ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulometria, orientou sobre o peneiramento do material. Na sequência têm-se a descrição das fases A, B, C e D, que compõem esta etapa.

#### **Fase A: Descrição das areias do estudo**

##### **Areia Normal (AN)**

A areia normal (AN), utilizada como referência no trabalho, é um agregado miúdo proveniente do IPT em São Paulo, especificado pela ABNT NBR 7214:1982 - Areia normal para ensaio de cimento – Especificação.

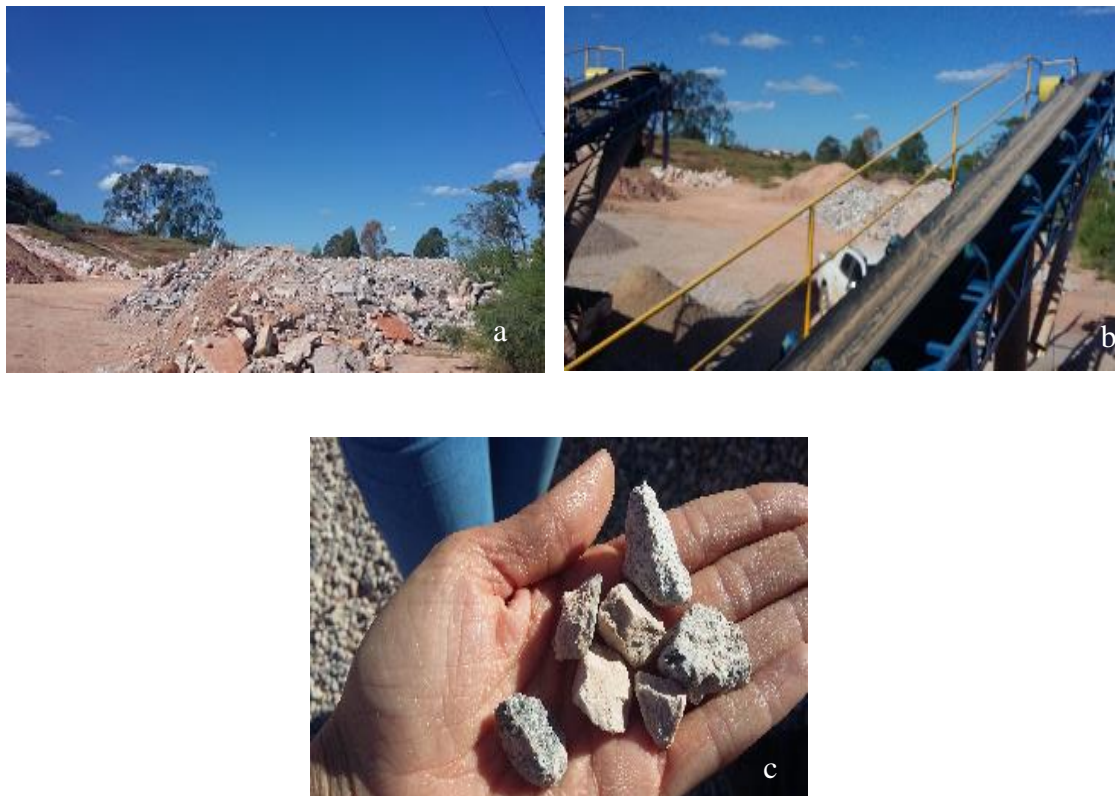
##### **Areia Reciclada 1 (AR1)**

A areia reciclada 1 (AR1) é proveniente de uma usina de reciclagem, que produz agregados graúdos e miúdos reciclados. Localizada em Sobradinho, Distrito Federal, é considerada a única usina de reciclagem de RCD ativa no DF e recebe RCD das mais diversas obras de construção civil da região. O processo de beneficiamento realizado para obter a areia AR1 é o seguinte:

- ao chegarem à usina, os RCD passam por uma triagem manual, da qual apenas resíduos de cor cinza seguem para as próximas etapas de beneficiamento;

- os RCD passam por um britador de mandíbulas, modelo FACO°8050, com abertura de mandíbulas de 100mm;
- na sequência, o material passa por um segundo britador de mandíbulas, modelo FACO°8013, com abertura de mandíbulas de 50mm;
- a partir daí, o processo acontece por via úmida, passando por um moinho de martelos e seguindo para as peneiras de classificação, onde acontece a lavagem da areia.

Observa-se na Figura 3.2, a pilha de RCD utilizada para a produção das areias; a esteira que conduz o RCD até o primeiro britador de mandíbulas e o aspecto visual do material após a primeira britagem.



**Figura 3.2 \_ Imagens usina: (a) pátio de estocagem de resíduos triados; (b) esteira condutora dos RCDs, (c) aspecto visual após a primeira britagem.**

A coleta foi realizada em conformidade com as seguintes normas brasileiras: ABNT NBR NM 26:2009 -Agregados - Amostragem e ABNT NBR 10007:2004 - Amostragem de resíduos sólidos. O material coletado após a etapa de lavagem, chamado nessa pesquisa de “areia primária”, foi ensacado e transportado até o Laboratório de

Construção Civil do Instituto Federal de Brasília, Campus Samambaia, para realização dos ensaios.

Observou-se, durante a coleta, que a “areia primária” tinha cor rosada, o que indica que certamente são processados, além dos resíduos de concreto, outros materiais, como os cerâmicos, por exemplo. Apesar do processamento acontecer parcialmente por via úmida e contar com uma etapa de lavagem, observou-se também a presença de material pulverulento nesta areia.

### **Areia Reciclada 2 (AR2)**

A areia reciclada 2 (AR2) é um agregado miúdo proveniente de corpos de prova de concreto, fornecidos por uma usina de concreto, localizada em Ceilândia Norte, Brasília, DF. Os corpos de prova eram provenientes da etapa de controle de qualidade da usina, tinham idades superiores a 28 dias, continham agregados tanto de origem carbonática quanto ígnea, e pertenciam a diversas classes de resistência. Os corpos de prova foram transportados até o Laboratório de Construção Civil do Instituto Federal de Brasília, Campus Samambaia, onde foram beneficiados e posteriormente ensaiados. O processo de beneficiamento realizado para obter a areia AR2 foi o seguinte:

- os corpos de prova foram fragmentados, com uso de uma marreta;
- na sequência, foram inseridos em um britador de mandíbula, de escala laboratorial, produzido pela Pavitest, modelo I-4198, com abertura máxima de mandíbula (25 mm);
- o material passou por uma segunda britagem, a fim de alcançar granulometrias mais finas, no mesmo britador de mandíbulas, agora com abertura mínima da mandíbula (15 mm);

Após a segunda britagem, observou-se que foi gerado um volume em torno de 20% de finos, do volume total final de materiais. Observa-se na Figura 3.3, a seguir, o britador de Mandíbulas utilizado, parte dos corpos de prova utilizados para produção da areia AR2, e o aspecto visual do material após a primeira britagem.

Após a segunda britagem, observou-se que foi gerado em torno de 20% de finos. Observa-se na Figura 3.3, o britador de Mandíbulas utilizado, parte dos corpos de prova utilizados para produção da areia AR2, e o aspecto visual do material após a primeira britagem.



**Figura 3.3 \_ (a) Imagem do britador de Mandíbula, escala laboratorial, (b) Corpos de prova para britagem, (c) Material após a primeira britagem.**

Na sequência a areia AR2 foi umedecida para realização do procedimento de homogeneização.

### **Fase B: Homogeneização das areias recicladas**

A homogeneização da areia primária AR1 e da areia AR2 aconteceu seguindo as recomendações da norma brasileira ABNT NBR NM 27:2001- Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório (Método B). Na homogeneização dos montes de agregados umedecidos, os mesmos foram revirados por completo três vezes, cuidando para que todo o procedimento acontecesse sobre uma superfície rija, limpa e plana. Na sequência, as areias foram secas em estufa por 24h, à temperatura de  $105^{\circ}\text{C}\pm 5$ , e depois peneiradas.

### **Fase C: Separação granulométrica das areias por peneiramento**

A separação granulométrica foi realizada em acordo a ABNT NBR NM 248:2003 - Agregados - Determinação da composição de granulometria e foram utilizadas as peneiras da série normal padrão ABNT, dispostas de cima para baixo, nesta ordem de abertura: 2,40mm, 1,18mm, 0,60mm, 0,30mm e 0,15mm. Após o peneiramento, frações granulométricas das areias, assim como o material retido no fundo da sequência de peneiras, foram acondicionados em sacos plásticos e devidamente identificados. Vale ressaltar que, antes de qualquer ensaio de classificação ou caracterização, as amostras eram reduzidas através do mecanismo de quarteamento, de acordo com a ABNT NBR NM 27:2001 - “Método A”.

### **Fase D: Lavagem das areias recicladas**

As lavagens das frações das areias recicladas aconteceram sob água corrente, cerca de 1 kg por 3 minutos, nas peneiras em que as frações granulométricas ficavam retidas. Após as lavagens, as mesmas foram secas em estufa, à  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados.

As areias AR1 e AR2 utilizadas no trabalho, foram submetidas a uma etapa de lavagem, sendo a areia AR1 lavada na usina e a areia AR2 no laboratório.

A lavagem da areia AR2 teve como objetivos: enquadrá-la aos requisitos da ABNT NBR 15116:2004 com relação à presença de finos; equipará-la à areia AR1 \_ que havia passado por uma etapa de lavagem na usina \_ e testar a influência da presença de finos nas taxas de absorção de água das frações.

Já a areia AR1 também foi submetida à uma nova lavagem em laboratório, unicamente com o objetivo de testar a relação entre a presença de finos e a absorção de água.

Os ensaios que serão apresentados na 2ª e a 3ª Etapas foram realizados para todas as condições apresentadas na Tabela 3.1. Já os ensaios da 4ª Etapa foram realizados nas condições: fração grossa, fração média-grossa, fração média-fina, fração fina e fração pulverulenta.

**Tabela 3.1: Descrição das condições estudadas.**

| <b>Condições estudadas</b> | <b>Descrição das condições estudadas</b>                       | <b>Areia correspondente</b> |
|----------------------------|--|-----------------------------|
| Fração Grossa              | areia passante na peneira de malha 2,40 mm e retida na 1,18 mm | AN, AR1 e AR2               |
| Fração Média Grossa        | areia passante na peneira de malha 1,18 mm e retida na 0,60 mm | AN, AR1 e AR2               |
| Fração Média Fina          | areia passante na peneira de malha 0,60 mm e retida na 0,30 mm | AN, AR1 e AR2               |
| Fração Fina                | areia passante na peneira de malha 0,30 mm e retida na 0,15 mm | AN, AR1 e AR2               |
| Areia Composta             | composição em partes iguais das quatro frações granulométricas | AN, AR1 e AR2               |
| Fração Pulverulenta        | resíduo pulverulento, retido no fundo das peneiras             | FP1, FP2                    |

### **3.1.2 2º Etapa: Ensaios de cumprimento dos requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural**

O objetivo da realização desta etapa foi o de investigar se as frações granulométricas das areias recicladas, enquadravam-se às normas brasileiras para agregados reciclados. Justifica-se a escolha da ABNT NBR 15116:2004 como referência, uma vez que ela se apresenta de forma geral coerente aos padrões internacionais no que se refere ao uso dos agregados reciclados (ver item 2.1.1). Contudo o trabalho se reportará, sempre que possível, também aos padrões internacionais.

As areias AR1 e AR2 foram avaliadas conforme os requisitos para classificação como agregado reciclado de concreto (ARC), ou agregado reciclado misto (ARM), para uso em concreto sem função estrutural, segundo a ABNT NBR 15116:2004. A Tabela 3.2, a seguir, lista os ensaios, as normas de referência e os respectivos limites propostos pela ABNT NBR 15116:2004.

**Tabela 3.2: Ensaios realizados para cumprimento dos requisitos para agregado reciclado miúdo destinado ao preparo de concreto sem função estrutural (ABNT NBR 15116:2004).**

| Parâmetros Avaliativos                                | Norma de referência           | Limites (%) Agregados Reciclado “Classe A” |      |
|---|-------------------------------|--|------|
|   |                               | ARC  | ARM  |
| Absorção de água                                      | ABNT NBR NM 30:2001           | ≤ 12                                       | ≤ 17 |
| Contaminantes: cloretos e sulfatos                    | ABNT NBR 9917:2009            | 1  | 1    |
| Contaminantes: materiais não minerais                 | ABNT NBR 15116:2004 (Anexo B) | 2  | 2    |
| Contaminantes: torrões de argila e materiais friáveis | ABNT NBR 7218:2010            | 2  | 2    |
| Teor total máximo de contaminantes                    | ABNT NBR 15116:2004           | 3  | 3    |
| Teor de material passante na malha 75 µm (%)          | ABNT NBR NM 46:2003           | ≤ 15                                       | ≤ 20 |

Em relação ao limite de absorção de água pelos agregados miúdos mistos, a norma japonesa é mais restritiva, permitindo no máximo 13% de absorção, enquanto que a ABNT NBR 15116:2004, permite até 17% (Tabela 3.2). No que diz respeito ao método adotado para determinação da absorção de água, a norma ABNT NBR NM 30:2001 e a inglesa, BSI-BS 812, seguem procedimentos similares (ULSEN, 2011).

Em relação aos conteúdos de sulfato e cloretos, a ABNT NBR 15116:2004 segue as recomendações da RILEM TC 121-DRG (1994) e permite que os agregados reciclados apresentem no máximo 1% de sulfato e 1% de cloreto (Tabela 3.1).

Os ensaios da 2ª e 3ª Etapas foram realizados no Laboratório de Construção Civil, do Instituto Federal de Brasília (IFB), Campus Samambaia. Para determinar o percentual de contaminantes cloretos e sulfatos (Tabela 3.2), foi utilizada como técnica complementar a cromatografia iônica. As análises foram realizadas no laboratório da Solo Química, empresa prestadora de serviço para o ramo de agricultura e meio ambiente, com sede em Brasília, DF.

A cromatografia iônica é uma técnica que possibilita a determinação de ânions, cátions, ácidos orgânicos, aminas e silicatos, com baixos limites de detecção. Para a análise,



amostras da fração grossa das areias recicladas foram trituradas com martelo de ferro e peneiradas (0,053mm). Na sequência 1g do pó foi dissolvido em 50ml de água pura. Após ser filtrado (0,45 µm), o líquido foi analisado no Cromatógrafo de Íons, modelo 883 Basic IC Plus, a análise durou cerca de 15min.

### 3.1.3 3° Etapa: Ensaios de caracterização física das areias

Esta etapa teve como objetivo caracterizar fisicamente as areias AR1, AR2 e suas frações pulverulentas (FP1 e FP2). A Tabela 3.3, apresenta os ensaios e suas respectivas normas de referência.

**Tabela 3.3: Normas de referência para os ensaios de caracterização física das areias estudadas.**

| Ensaios  | Norma de referência |
|--|---------------------|
| Determinação da massa específica aparente seca, massa específica na condição SSS e a massa específica. | ABNT NBR NM 52:2003 |
| Determinação da absorção de água.  | ABNT NBR NM 30:2001 |
| Determinação da massa unitária, da massa unitária na condição SSS e do volume de vazios.               | ABNT NBR NM 45:2006 |

Seguindo as orientações normativas (Tabela 3.3), todos os ensaios foram realizados em duplicata. Relata-se, porém, que neste trabalho, assim como em outras pesquisas (LEITE, 2001, CARRIJO, 2005 e ULSEN, 2011), houveram dificuldades na determinação da condição superfície saturada seca (SSS); motivo pelo qual os ensaios de massa específica e absorção de água em vários momentos precisaram ser repetidos.

O fator de empacotamento foi calculado para a condição areia composta (Tabela 3.1), através das equações 3.1 e 3.2 retiradas de Girardi, Martins Filho e Carasek (2017).

$$E0 = 100 - [e/(1 + e) \times 100] \quad (3.1)$$

Sendo que:

$$e = ME/MU - 1 \quad (3.2)$$

Onde:

e : índice de vazios [adimensional];

ME: massa específica [g/cm<sup>3</sup>];

MU: massa unitária [g/cm<sup>3</sup>];

E0: fator de empacotamento [adimensional].

Como análises complementares, propôs-se observar as características visuais das areias, como cor, forma e textura da superfície. Para tanto, amostras das quatro frações granulométricas – das areias AN, AR1 e AR2 – foram fotografadas com o auxílio de uma lupa eletrônica, modelo Proscope HR LED, resolução 640X450 pixels, a qual gera imagens do tipo JPEG.

### 3.1.4 4º Etapa: Análises químicas e mineralógicas das areias.

Uma vez que esta etapa procurou identificar os prováveis constituintes mineralógicos e químicos presentes nos materiais do trabalho, optou-se por realizar as seguintes análises: análise química por Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX), perda ao fogo (PF) e análise mineralógica por Difração de Raios X (DRX). As análises foram realizadas em amostras das quatro frações granulométricas da areia de referência e das areias recicladas, além das frações pulverulentas (FP1 e FP2).

A fim de garantir a homogeneização das amostras e sua representatividade analítica, amostras das frações das areias recicladas e das frações pulverulentas foram pulverizadas em moinho de esferas, modelo Pulverisette da marca Fritsch. Tanto as esferas, quanto o interior das panelas eram de ágata, conforme recomendado em Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016). A Figura 3.4, apresenta imagens do moinho, das esferas e da panela.



Figura 3.4 \_ (a) moinho de esferas, (b) detalhe de uma das panelas e das esferas de ágata.

### **A) Análise química por espectrometria por fluorescência de raios X (FRX)**

A aplicação da técnica de análise química por fluorescência de raios X, teve como propósito, identificar e quantificar os prováveis elementos constituintes das areias utilizadas no trabalho. As análises foram realizadas na Central Analítica do Instituto de Química da UnB- Campus Darcy Ribeiro. O equipamento utilizado foi um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (XRF/EDX), da marca Shimadzu, modelo EDX-720HS. Utilizou-se como padrão de calibração, a liga A750, as análises foram realizadas à vácuo e foi utilizado uma quantidade de material pulverizado (Figura 3.4) suficiente para cobrir o fundo do porta amostras.

### **B) Perda ao fogo**

A análise de perda ao fogo foi utilizada no trabalho com o propósito inicial de mensurar indiretamente os compostos constituintes do cimento. As análises seguiram as recomendações da ABNT NM 18:2012- Cimento Portland - Análise Química- Determinação de perda ao fogo e foram realizadas no Instituto de Geocronologia da UnB, Campus Darcy Ribeiro. A amostra inicial tinha massa de 3 g, verificada em balança com precisão de 0,0001 g. Após ser pesada, foi levada ao forno tipo mufla, onde foi aquecida a uma taxa de aquecimento livre até atingir a temperatura de  $1000^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , permanecendo nesta temperatura por 120 min. Após este período, a amostra foi retirada da mufla e colocada em um dessecador, até atingir a temperatura ambiente, para então ser pesada.

### **C) Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)**

Optou-se por aplicar esta análise, de caráter qualitativo, por ser um dos métodos mais utilizados na identificação dos minerais e da estrutura cristalina dos materiais. As análises aconteceram no Laboratório de Difração de Raios X, do Instituto de Geociências da UnB, Campus Darcy Ribeiro.

Por meio do método do pó, uma amostra de 10g foi introduzida em um difratômetro do tipo Goniometer, modelo Ultima IV, da marca Rigaku, com voltagem de 35 kV e amperagem de 15 mA, em sistema  $\theta/2\theta$ , com velocidade de varredura de  $5^{\circ}/\text{min}$ , passo de  $0,05^{\circ}$ , de  $2^{\circ}$  a  $80^{\circ}$  em  $2\theta$ . A fonte de energia é um filamento de tungstênio (cátodo) e o

tubo de raios X, de cobre (ânodo), cujo comprimento de onda é  $K\alpha$  1,5406 Å. As interpretações foram realizadas em computador acoplado ao difratômetro, fazendo-se uso do software JADE, versão 2010, com banco de dados *International Centre for Diffraction Data* (ICDD), de 2010, que contém cerca de 218 mil fichas entre minerais, cimentos e materiais cimentícios.

### **3.2 PARTE 2: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DAS ARGAMASSAS RECICLADAS**

A Parte 2 do trabalho teve o objetivo de investigar a interferência das frações granulométricas das areias recicladas AR1 e AR2 no comportamento físico-mecânico de argamassas. Após serem devidamente caracterizadas, as frações granulométricas das areias recicladas AR1 e AR2 foram incorporadas em argamassas, denominadas “argamassas recicladas”, em substituições de 25% e 100% da massa total de areia. As areias foram adicionadas à mistura na condição de umidade, seca ao forno a 105°C por 24 h.

Em relação às escolhas dos teores de substituição, o teor de 25% foi escolhido devido à necessidade de cumprimento do objetivo geral do trabalho, que é o de avaliar a influência de cada uma das quatro frações granulométricas no comportamento físico-mecânico das argamassas. Já a escolha pelo teor de 100%, se deve à necessidade de avaliar a influência das areias recicladas no desempenho físico-mecânico de argamassas totalmente recicladas, uma vez que não só o Brasil, mas alguns países como Japão, Suíça e Rússia permitem o uso integral dos agregados miúdos reciclados em argamassas. O teor de 100% também se justifica uma vez que a Parte 3 do trabalho avalia a influência das areias recicladas na microestrutura das argamassas. A Tabela 3.4 a seguir, apresenta as nomenclaturas adotadas para as argamassas confeccionadas e a Tabela 3.5, apresentada na sequência, traz o percentual substituído pelas areias recicladas em cada uma das frações da areia normal.

**Tabela 3.4: Descrição das nomenclaturas adotadas para argamassas recicladas.**

| Descrição  | Nomenclatura            |
|--|-------------------------|
| Argamassa composta pelas quatro frações granulométricas da areia AN  | ARG <sub>AN</sub>       |
| Argamassa com substituição da fração grossa da AN pela fração grossa da AR1  | ARG <sub>AR1G</sub>     |
| Argamassa com substituição da fração média grossa da AN pela fração média grossa da AR1  | ARG <sub>AR1MG</sub>    |
| Argamassa com substituição da fração média fina da AN pela fração média fina da AR1  | ARG <sub>AR1MF</sub>    |
| Argamassa com substituição da fração fina da AN pela fração fina da AR1  | ARG <sub>AR1F</sub>     |
| Argamassa com substituição das quatro frações da AN pelas quatro frações da AR1  | ARG <sub>AR1AC</sub>    |
| Argamassa com substituição de 25% de cada uma das quatro frações da AN por 25% das quatro frações correspondentes da areia AR1 | ARG <sub>AR1AC25%</sub> |
| Argamassa com substituição da fração grossa da AN pela fração grossa da AR2  | ARG <sub>AR2G</sub>     |
| Argamassa com substituição da fração média grossa da AN pela fração média grossa da AR2  | ARG <sub>AR2MG</sub>    |
| Argamassa com substituição da fração média fina da AN pela fração média fina da AR2  | ARG <sub>AR2MF</sub>    |
| Argamassa com substituição da fração fina da AN pela fração fina da AR2  | ARG <sub>AR2F</sub>     |
| Argamassa com substituição das quatro frações da AN pelas quatro frações da AR2  | ARG <sub>AR2AC</sub>    |
| Argamassa com substituição de 25% de cada uma das quatro frações da AN por 25% das quatro frações correspondentes da areia AR2 | ARG <sub>AR2AC25%</sub> |

**Tabela 3.5: Porcentagens de substituições das frações granulométricas das areias recicladas no traço da argamassa padrão.**

| Nomenclatura            | Fração grossa (%) | Fração média grossa (%) | Fração média fina (%) | Fração fina (%) |
|-------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| ARG <sub>AN</sub>       | -                 | -                       | -                     | -               |
| ARG <sub>AR1G</sub>     | 100               | -                       | -                     | -               |
| ARG <sub>AR1MG</sub>    | -                 | 100                     | -                     | -               |
| ARG <sub>AR1MF</sub>    | -                 | -                       | 100                   | -               |
| ARG <sub>AR1F</sub>     | -                 | -                       | -                     | 100             |
| ARG <sub>AR1AC</sub>    | 100               | 100                     | 100                   | 100             |
| ARG <sub>AR1AC25%</sub> | 25                | 25                      | 25                    | 25              |
| ARG <sub>AR2G</sub>     | 100               | -                       | -                     | -               |
| ARG <sub>AR2MG</sub>    | -                 | 100                     | -                     | 0               |
| ARG <sub>AR2MF</sub>    | -                 | -                       | 100                   | -               |
| ARG <sub>AR2F</sub>     | -                 | -                       | -                     | 100             |
| ARG <sub>AR2AC</sub>    | 100               | 100                     | 100                   | 100             |
| ARG <sub>AR2AC25%</sub> | 25                | 25                      | 25                    | 25              |

As argamassas confeccionadas para esta pesquisa seguiram o padrão de testes de cimento, estabelecidos pela ABNT NBR 7215:1997 Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. A norma define que os corpos de prova sejam confeccionados com argamassa composta de uma parte de cimento, três de areia normalizada, em massa e com relação água/cimento de 0,48. A massa de cada uma das quatro frações granulométricas da areia deve ser de 465g, totalizando 1860g de areia, enquanto a massa do cimento é de 624g.

O cimento Portland utilizado no trabalho foi o CPII-F-32. Tal escolha se deve à preocupação em utilizar um aglomerante isento de materiais pozolânicos ou escórias,

compostos que pudessem dificultar a avaliação da interferência das areias ou das frações pulverulentas estudadas. Foram adquiridos sacos do mesmo lote deste cimento e, como os mesmos precisavam ser armazenados por alguns meses, optou-se por acondicioná-los em barris, os quais foram mantidos fechados, à prova de água e vapor de água, em uma sala com baixa umidade relativa do ar, conforme orientação de Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016).

Os resultados dos ensaios de caracterização físico-mecânicos e químicos do cimento CII-F-32 estão apresentados na Tabela 3.6. A Figura 3.5 a seguir apresenta o difratograma com as fases cristalinas do cimento e na Figura 3.6, na sequência, a curva granulométrica.

**Tabela 3.6: Caracterização do cimento Portland CII-F-32.**

| <b>Propriedade</b>                            | <b>(%) óxidos mais estáveis.</b> |        |                   |                     |
|---|----------------------------------|--------|-------------------|---------------------|
| Espectrometria por Fluorescência de Raio-X    | CaO                              | 65.696 | BaO               | 0.365               |
|   | SiO <sub>2</sub>                 | 14.064 | TiO <sub>2</sub>  | 0.357               |
|   | MgO                              | 4.995  | K <sub>2</sub> O  | 0.275               |
|   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 4.667  | MnO               | 0.185               |
|   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 3.212  | ZrO <sub>2</sub>  | 0.082               |
|   | SO <sub>3</sub>                  | 2.972  | ZnO               | 0.067               |
|   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>    | 2.063  | Au <sub>2</sub> O | 0.003               |
|   | SrO                              | 0.998  |                   |                     |
| Tempos de Pega                                | Percentual de água               |        |                   | 29,0%               |
|   | Tempo de Início de pega          |        |                   | 2:48hs              |
|   | Tempo de fim de pega             |        |                   | 3:59hs              |
| Massa Específica (Le Chatelier)               | $\gamma = 3,13\text{g/cm}^3$     |        |                   |                     |
| Resistência à Compressão                      | 3° dia                           |        |                   | 16,4MPa             |
|   | 7° dia                           |        |                   | 26,9MPa             |
|   | 28° dia                          |        |                   | 35,8MPa             |
| Curva Granulométrica (Granulometria a Laser). | D <sub>médio</sub>               |        |                   | 18,7 $\mu\text{m}$  |
|   | D <sub>10%</sub>                 |        |                   | 3,31 $\mu\text{m}$  |
|   | D <sub>50%</sub>                 |        |                   | 17,06 $\mu\text{m}$ |
|   | D <sub>90%</sub>                 |        |                   | 36,14 $\mu\text{m}$ |

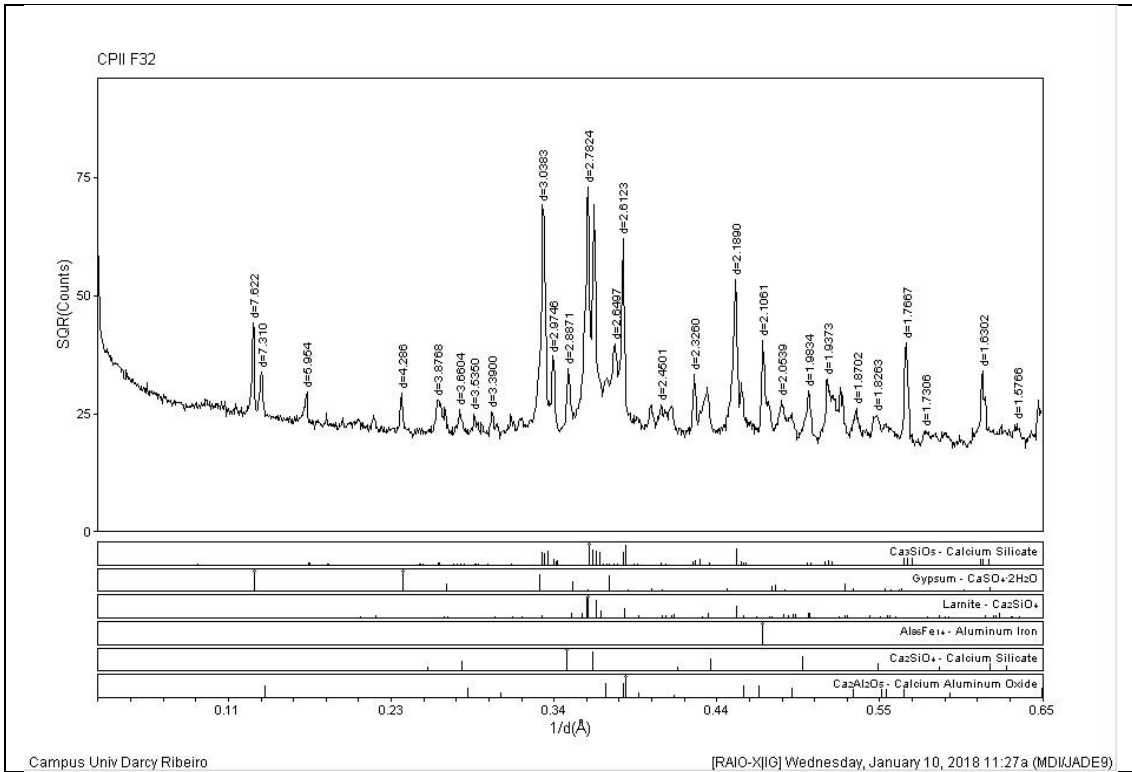


Figura 3.5 – Difratoograma de raios X do cimento CII-F-32

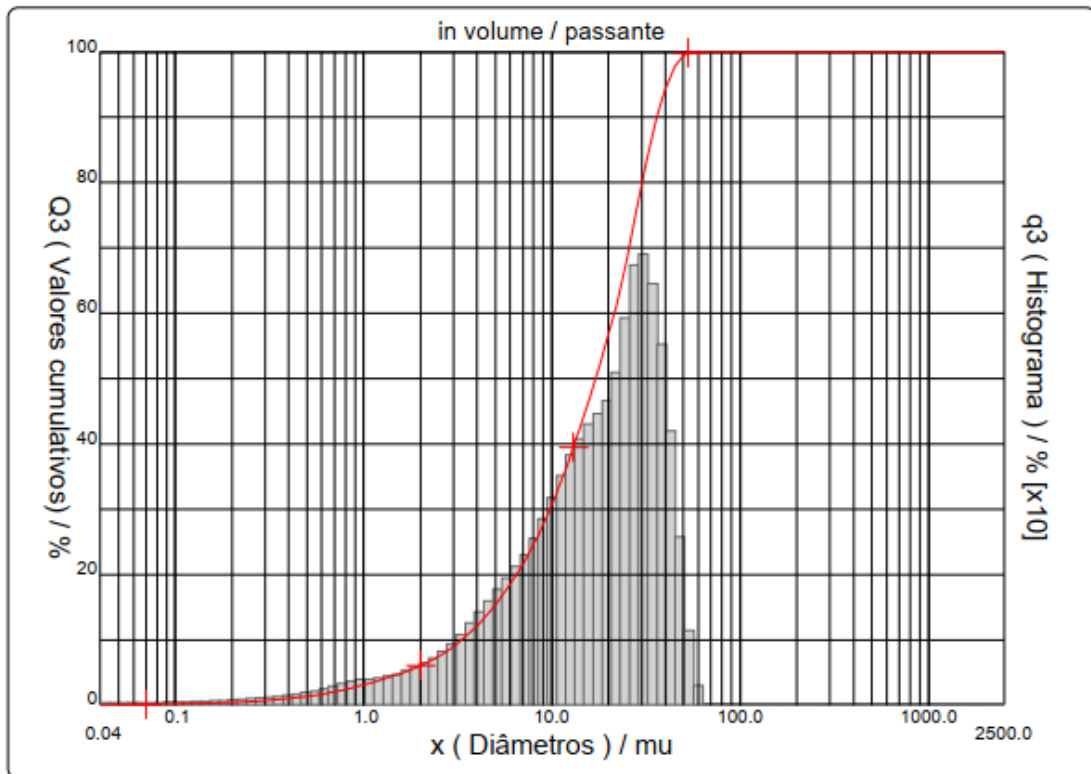


Figura 3.6 – Curva granulométrica do cimento CII-F-32

Foram realizados ajustes nas massas de água e nas massas de areia reciclada das argamassas recicladas, com o intuito de manter a mesma trabalhabilidade, e o mesmo volume das argamassas padrão.

Em relação aos ajustes de água, optou-se por adicionar 80% da água absorvida pela areia reciclada à água de amassamento, conforme recomendações da ABNT NBR 15116:2004 (equação 3.3).

$$M = \frac{M_{H_2O} \times 0,8 \times (A_{AR} - A_{AN})}{100} + M_{H_2O} \quad (3.3)$$

Onde:

M é a massa de água corrigida [g];

A<sub>AR</sub> é a absorção de água da areia reciclada [%];

A<sub>AN</sub> é a absorção de água da areia de referência [%];

M<sub>H<sub>2</sub>O</sub> é a massa total de água no traço de referência [g]

Tal escolha se fundamenta em estudos (HANSEN, 1992; CABRAL, 2007) que mostraram, através do monitoramento de curvas de absorção de água, que os agregados reciclados absorvem 80% de toda água nas primeiras 24h. Contudo, neste trabalho optou-se por adicionar toda a água no momento do amassamento, uma vez que estudos (POON, SHUI e LAM, 2004; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013; MALTA *et al.*, 2014; MIRANDA, 2014) têm mostrado que a pré-saturação da areia reciclada, pode levar a maior migração de água para a matriz cimentícia, aumento ainda mais a relação água/cimento na região da zona de transição, causando prejuízos mecânicos.

Os ajustes nas massas das areias recicladas foram realizados utilizando a correção volumétrica, conforme Leite (2001) (equação 3.4, a seguir).



$$M = \frac{ME_{AR}}{ME_{AN}} \times M_T \quad (3.4)$$

Onde:

M é a massa da areia corrigida [g];

ME<sub>AR</sub> é a massa específica da areia reciclada [g/cm<sup>3</sup>];

ME<sub>AN</sub> é a massa específica da areia de referência [g/cm<sup>3</sup>];

M<sub>T</sub> da massa total da areia no traço de referência [g]

A Tabela 3.7 apresenta os valores de compensação das massas de água e de areia recicladas.

**Tabela 3.7: Valores de compensação das massas de água e das massas das areia recicladas.**

| Massa (g)                     | Substituição de 25% |                  |                |              |                    | Substituição de 100% |
|-------------------------------|---------------------|------------------|----------------|--------------|--------------------|----------------------|
|                               | Fração Grossa       | Fração M. grossa | Fração M. fina | Fração Fina  | Areia Composta 25% | Areia Composta       |
| A. AN (%)                     | 0,2                 | 1,0              | 0,9            | 0,3          | 0,9                | 0,9                  |
| A. AR1 (%)                    | 5,4                 | 5,2              | 2,9            | 1,7          | 2,8                | 2,8                  |
| <b>Massa de Água AR1 (g)</b>  | <b>78,1</b>         | <b>77,5</b>      | <b>76,2</b>    | <b>75,8</b>  | <b>76,1</b>        | <b>304,5</b>         |
| M.E. AN (g/cm <sup>3</sup> )  | 2,3                 | 2,6              | 2,3            | 2,1          | 2,3                | 2,3                  |
| M.E. AR1 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,0                 | 2,0              | 2,2            | 2,2          | 2,1                | 2,1                  |
| <b>Massa de AR1 (g)</b>       | <b>394,3</b>        | <b>351,0</b>     | <b>438,0</b>   | <b>481,3</b> | <b>417,1</b>       | <b>1668,5</b>        |
| A. AN (%)                     | 0,2                 | 1,0              | 0,9            | 0,3          | 0,9                | 0,9                  |
| A. AR2 (%)                    | 1,1                 | 3,9              | 3,7            | 3,9          | 2,9                | 2,9                  |
| <b>Massa de Água AR2 (g)</b>  | <b>75,6</b>         | <b>76,7</b>      | <b>76,7</b>    | <b>77,1</b>  | <b>76,1</b>        | <b>304,7-</b>        |
| M.E. AN. (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,3                 | 2,6              | 2,3            | 2,1          | 2,3                | 2,3                  |
| M.E. AR2 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,6                 | 2,2              | 2,0            | 1,8          | 2,1                | 2,1                  |
| <b>Massa de AR2 (g)</b>       | <b>468,0</b>        | <b>390,0</b>     | <b>404,0</b>   | <b>403,7</b> | <b>431,3</b>       | <b>1725,5</b>        |

Mesmo realizando ajustes nas massas de água, foi necessário adicionar às misturas (que continham areias recicladas), incrementos do aditivo superplastificante, a fim de alcançar a consistência das argamassas padrão (125 ± 10 mm). Para tal, foi utilizado o aditivo Tec Flow 530N, da marca Grace Construction Products. A Tabela 3.8 a seguir, apresenta as consistências das misturas e as taxas de aditivo utilizados.

**Tabela 3.8: Consistências das misturas e as taxas de aditivo utilizados.**

| Misturas             | Consistência da mistura (mm) | Taxa de aditivo (%) | Misturas                | Consistência da mistura (mm) | Taxa de aditivo (%) |
|----------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|
| ARG <sub>AN</sub>    | 125±10                       | -                   | ARG <sub>AR2MF</sub>    | 120                          | 0,02                |
|                      |                              |                     | ARG <sub>AR1F</sub>     | 122                          | 0,02                |
| ARG <sub>AR1G</sub>  | 122,5                        | 0,02                | ARG <sub>AR2F</sub>     | 115,5                        | 0,03                |
| ARG <sub>AR2G</sub>  | 135                          | 0,02                | ARG <sub>AR1AC25%</sub> | 127,5                        | 0,02                |
| ARG <sub>AR1MG</sub> | 127,5                        | 0,02                | ARG <sub>AR2AC25%</sub> | 117,5                        | 0,02                |
| ARG <sub>AR2MG</sub> | 120                          | 0,02                | ARG <sub>AR1AC</sub>    | 115                          | 0,03                |
| ARG <sub>AR1MF</sub> | 120                          | 0,02                | ARG <sub>AR1AC</sub>    | 115                          | 0,10                |

Observa-se na Tabela 3.8, que os teores de aditivos necessários para manter a consistência desejada, variaram de 0,02% a 0,1% da massa de cimento, ou seja, abaixo da faixa recomendada pela fabricante, que é de 0,3% a 1,2%. Tal fato se deve aos incrementos de água que foram adicionados às misturas, devido as compensações realizadas (Tabela 3.7). Ajustes prévios foram realizados, a fim de alcançar os teores ideais de aditivo.

Os procedimentos de moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova também seguiram as recomendações da ABNT NBR 7215:1997. Como objetivo desta parte do trabalho foi avaliar como as argamassas com areia reciclada se comportavam física e mecanicamente, os ensaios apresentados na Tabela 3.9, serviram de parâmetros para as avaliações.

**Tabela 3.9: Ensaio físico-mecânicos e as respectivas normas de referência.**

| Ensaio  | Norma de referência         |
|---|-----------------------------|
| Determinação do índice de consistência normal                     | ABNT NBR 7215:1997 Anexo B. |
| Resistência à compressão axial                                    | ABNT NBR 7215:1997          |
| Tração por compressão diametral                                   | ABNT NBR 7222:2011          |
| Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica | ABNT NBR 9778:2009          |

A moldagem dos corpos de prova, assim como os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram realizados no Laboratório de Construção Civil do Instituto Federal de Brasília (IFB), Campus Samambaia.

Os ensaios de resistência à compressão axial e de resistência à tração por compressão diametral foram realizados no laboratório do Instituto de Tecnologia SENAI, em

Taguatinga, DF. Os corpos de prova de argamassas foram rompidos por compressão simples nas idades de 03, 07 e 28 dias. O equipamento utilizado foi uma prensa Pavitest, modelo NS 13896, capacidade: 1000KN, Classe: 1.00. Os ensaios de tração por compressão diametral foram realizados nos corpos de prova de argamassa na idade de 28 dias e o equipamento utilizado foi uma prensa EMIC, modelo PCE 100C, capacidade: 1000KN, classe: 1.00A.

### **3.3 PARTE 3: ANÁLISES MICROESTRUTURAIS DAS ARGAMASSAS RECICLADAS**

Este momento do trabalho foi dedicado às análises microestruturais, que foram realizadas em amostras da argamassa padrão ( $ARG_{AN}$ ) e em amostras das argamassas recicladas com 100% de areia reciclada ( $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ ). Como um dos objetivos desta parte do trabalho foi observar a formação das zonas de transição, optou-se por realizar as análises em uma idade inicial de sete dias, acreditando haver maiores chances de observação da formação desta região.

As seguintes técnicas de análises microestruturais foram utilizadas: análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS e porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).

Pequenos corpos de prova foram confeccionados, ao invés da coleta de testemunhos dos corpos de prova convencionais, que neste caso precisariam ser serrados ou quebrados, o que de acordo com Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), poderia causar microfissuras nas amostras, principalmente nas zonas de transição.

Os corpos de prova cilíndricos, de diâmetro e altura de 15 mm foram moldados em segmentos de tubo de PVC. Para moldá-los, porções de argamassa eram cuidadosamente inseridas no tubo e adensados com uma haste de madeira com 3 mm de diâmetro e 40mm de comprimento. Os corpos de prova foram desformados e curados até a idade de 7 dias, conforme a ABNT NBR 7215:1997. Na sequência os mesmos foram submetidos ao processo de paralisação da hidratação.

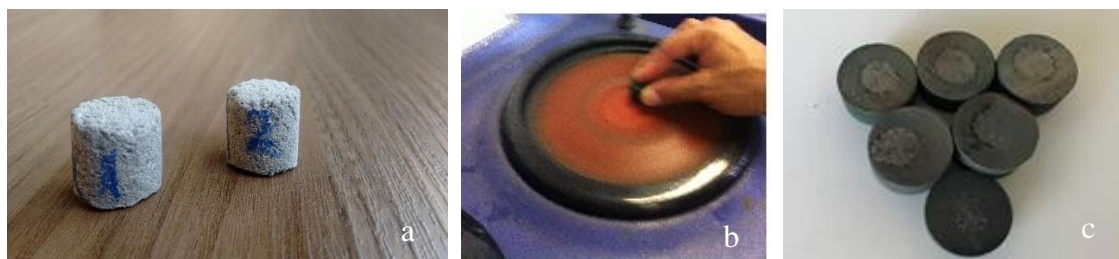
A seguir apresenta-se a sequência do procedimento de paralisação da hidratação, baseado em Manzano (2016) e Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016):

- os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, lavados em água corrente e secos superficialmente, utilizando-se papel toalha;
- em seguida, foram submergidos em álcool isopropílico, por 24 horas;
- após este período, foram levados para a estufa, à 40°C, por 24 horas;
- após serem retirados da estufa, foram levados ao dessecador;
- quando atingiram a temperatura ambiente, foram acondicionados em sacos plásticos, contendo sílica gel, os quais foram devidamente lacrados e identificados;
- por fim, seguiram para as análises microestruturais.

Na sequência tem-se um resumo das rotinas de realização das análises microestruturais, com as ponderações a respeito da contribuição destes ensaios para os objetivos da pesquisa.

### **3.3.1 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com (EDS)**

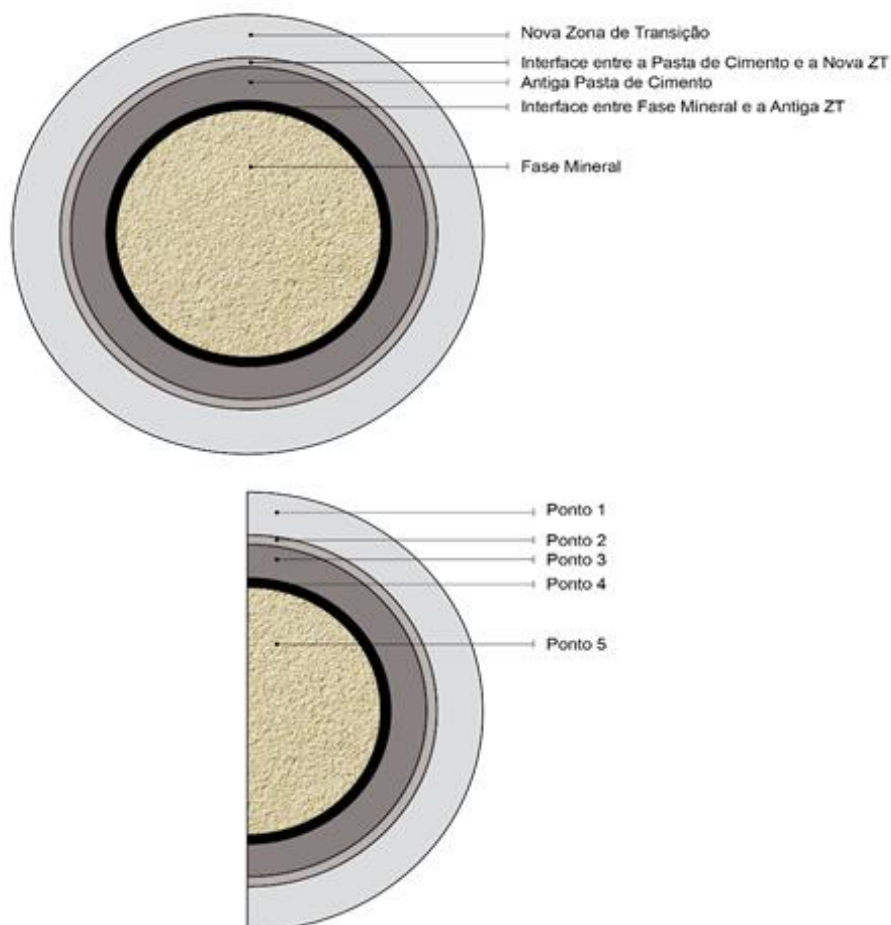
A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com (EDS), foi aplicada em amostras de argamassas, que foram embutidas em resina epóxi a quente e polidas; com intuito de melhorar o retorno de informações sobre os aspectos gerais das argamassas. Os corpos de prova foram polidos por cerca de 3 minutos nas lixas de gradação: #80, #100, #120, #180, #220, #280, #320, #360, #400, #600, #800, #1200, #2500. Para o acabamento, aplicou-se sobre a superfície das mesmas uma porção de pasta de diamante e o polimento final foi feito com um pano, (MANZANO, 2016). As amostras foram preparadas no Laboratório de Materiais da Universidade de Brasília (UnB), Campus Gama. Observa-se na Figura 3.7 a seguir, detalhes dos corpos de prova, o polimento das amostras após serem embutidas e as amostras prontas para as análises.



**Figura 3.7 \_ Preparação das amostras para o MEV: (a) corpos de prova de argamassa, (b) polimento de uma amostra após embutimento com resina epóxi, (c) amostras prontas para análise.**

Para as análises das argamassas, o MEV foi utilizado em conjunto com o espectrômetro de dispersão de energia (EDS), com detector de elétrons retroespalhados (BSE). A escolha do detector BSE, se deve ao fato do mesmo ser mais sensível à diferença de número atômico, além disso, o tamanho da amostra e a porosidade da resina epóxi, utilizada para embutir as amostras, não permitiram utilizar o equipamento a alto vácuo (SE).

O objetivo da aplicação desta técnica foi traçar um perfil de composição química a nível microestrutural, ponto a ponto, numa análise qualitativa dos prováveis elementos presentes nas fases das argamassas, conforme Figura 3.8 a seguir. Duas amostras de cada argamassa foram analisadas.



**Figura 3.8 \_ Mapa da região da zona de transição, com o perfil representado pelos pontos de 1 a 5.**

O perfil começaria na periferia, nova zona de transição (Ponto 1), passaria pela interface entre nova ZT e a antiga pasta de cimento (Ponto 2), chegando a antiga pasta de cimento (Ponto 3), depois à interface entre a antiga ZT (Ponto 4) e finalmente chegaria ao mineral (Ponto 5).

O trabalho aplicará uma metodologia de análise baseada em S. Chandra, L. Berntsson (2002) *apud* Vargas, Restrepo-Baena e Tobón (2017) e Li *et al* (2017). Onde serão considerados como prováveis produtos formados na nova ZT o hidróxido de cálcio (CH), contudo é possível que haja também formação de coloides de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e de etringita (AFt). Já a zona de transição na região de interface, haveria maior probabilidade de formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), com possibilidade também de formação de hidróxido de cálcio (CH) e carbonatados em menores proporções.

Sendo assim, baseado na literatura acima e no perfil da Figura 3.8, seriam identificados:

- **O Ponto 1** como sendo a nova zona de transição, com cerca de 40µm a 50 µm, podendo esta variar de tamanho conforme o tamanho do grão e a relação água/cimento. O EDS mostraria pico mais expressivo de Ca, e o provável produto formado seria o CH, com possibilidade de formação também de coloides (C-S-H) e (AFt);
- **O Ponto 2** como sendo a interface entre nova zona de transição e a antiga pasta de cimento. O EDS mostraria picos semelhantes de Ca e Si, com maior probabilidade de formação de C-S-H, com possibilidade também de formação de CH, em menores proporções;
- **O Ponto 3** como sendo a antiga pasta de cimento. O EDS mostraria pico mais expressivo de Ca, sendo que o provável produto formado seria o CH e carbonatados;
- **O Ponto 4** como sendo a interface entre a antiga zona de transição e o mineral. O EDS mostraria picos semelhantes de Ca e Si, com maior probabilidade de formação de C-S-H, com possibilidade também de formação de CH em menores proporções;
- **O Ponto 5** como sendo o mineral. O EDS mostraria pico expressivo de Si, sendo assim o provável produto formado seria o quartzo.

A microscopia também foi aplicada às frações das areias (AN, AR1 e AR2) e às frações pulverulentas (FP1 e FP2), com o intuito de conhecer suas morfologias. Para análise das areias, utilizou-se o detector de elétrons secundários (SE). As amostras foram submetidas a um vácuo entre 7 e 8 Pa, e na sequência foram metalizadas com ouro. O procedimento de recobrimento (deposição de íons metálicos de ouro) torna as amostras condutoras, o que gera imagens com boa resolução no MEV.

As análises foram realizadas no centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) da Universidade Federal de Goiás (UFG). O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JSM IT300LV (Figura 3.9).

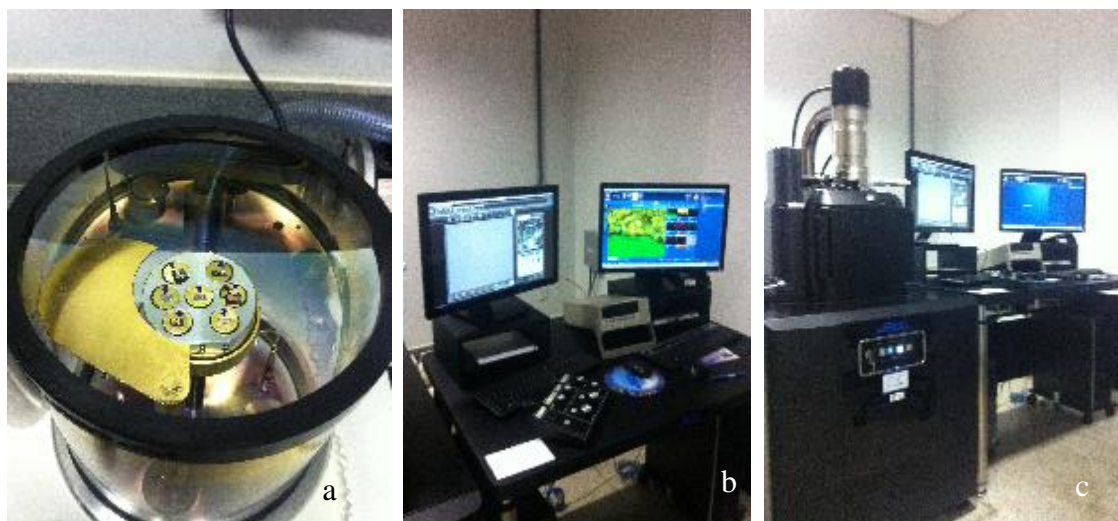


Figura 3.9 \_ (a) Amostras do carrossel com as frações das areias no metalizador, (b, c) imagens do MEV.

### 3.3.2 Caracterização da estrutura porosa por Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

Os pequenos corpos de prova (com hidratação paralisada) seguiram para o Laboratório de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Campus Uvaranas, onde foram ensaiados. Usando talhadeira e torquês, amostras na forma de cubos com 10mm de lado foram retirados do centro dos pequenos corpos de prova. Com o intuito de diminuir os tempos de execução do ensaio e garantir o vácuo das amostras, os prismas ficaram 24 h na estufa a uma temperatura de 30 °C. O equipamento utilizado foi o AutoPore IV 9500 V1.05, que se caracteriza por aplicar um intervalo de pressão de intrusão de mercúrio de 0 até cerca de 230 MPa, o que corresponde a uma faixa de poros entre 340  $\mu\text{m}$  e 5,5 nm. O ângulo de contato do mercúrio foi 141,3°, com uma tensão superficial de 0,485N/m.

Optou-se por classificar os poros das argamassas de acordo a DIN 66131:1973 (RATO, 2006). Sendo assim, para argamassas, as faixas de tamanhos de poros que se investiga são os macroporos ( $>0,05\mu\text{m}$ ) e os mesoporos (0,002 $\mu\text{m}$  a 0,05 $\mu\text{m}$ ). Sendo que para melhor compreensão dos comportamentos das argamassas deste estudo, os macroporos foram divididos em: macroporos capilares (0,05 $\mu\text{m}$  a 10 $\mu\text{m}$ ) e macroporos “poros grandes” (maiores que 10 $\mu\text{m}$ ), conforme Salomão (2016).



### **3.4 PARTE 4: ESTUDO DA POZOLANICIDADE DAS FRAÇÕES PULVERULENTAS**

A fração pulverulenta se refere ao passante na malha de peneira 0,075 mm (# 200), incluindo materiais solúveis em água. As frações FP1 e FP2 foram primeiramente caracterizadas; na sequência avaliou-se seus potenciais como material pozolânico. Por fim, investigou-se as mudanças físicas provocadas pelas frações pulverulentas na estrutura porosa das argamassas recicladas.

#### **3.4.1 1º Etapa: Caracterização das frações pulverulentas FP1 e FP2**

Os ensaios e análises de caracterização tiveram o propósito de conhecer a fração pulverulenta das areias recicladas, investigando a potencialidade de sua aplicação como materiais cimentícios suplementares.

As frações FP1 e FP2 foram submetidas aos ensaios de caracterização física: de massa unitária, massa específica e absorção de água, apresentados na Tabela 3.3 do item 3.1.3. As frações pulverulentas também foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os detalhes sobre o equipamento, e as condições de ensaio foram apresentados no item 3.3 (A).

Com o objetivo conhecer sobre sua composição mineralógica e química, amostras frações pulverulentas FP1 e FP2 passaram pela Análise Química por Fluorescência de Raios X, Perda ao fogo e Análise Mineralógica por Difração de raios-X (DRX). Os detalhes das condições destes ensaios foram apresentados no item 3.1.4 (A, B e C).

### 3.4.2 2º Etapa: Ensaios para cumprimento dos requisitos para materiais pozolânicos

#### A) Requisitos químicos

A pozolanicidade das frações pulverulentas FP1 e FP2, foi verificada por meio dos ensaios regulamentados pela ABNT NBR 12653:2015-Materiais pozolânicos-Requisitos.

A Tabela 3.10, é adaptada da ABNT NBR 12653:2015 e apresentam os requisitos químicos para os quais as frações FP1 e FP2 devem estar em conformidade, para serem consideradas materiais pozolânicos. As frações foram avaliadas, segundo os resultados de FRX e perda ao fogo. Os detalhes das condições do ensaio de PF foram apresentados no item 3.1.

**Tabela 3.10: Requisitos Químicos segundo a ABNT NBR 12653:2015.**

| Parâmetros Avaliativos (%)   | Classe do Material Pozolânico |       |       | Método de Ensaios   |
|--|-------------------------------|-------|-------|---------------------|
|  | N                             | C     | E     |                     |
| SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ≥ 70                          | ≥ 70  | ≥ 50  | ABNT NBR NM 22:2012 |
| SO <sub>3</sub>  | ≤ 4                           | ≤ 5   | ≤ 5   | ABNT NBR NM 16:2004 |
| Teor de umidade  | ≤ 3                           | ≤ 3   | ≤ 3   | ABNT NBR NM 24:2003 |
| Perda ao Fogo  | ≤ 10                          | ≤ 6   | ≤ 6   | ABNT NBR NM 18:2012 |
| Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O   | ≤ 1,5                         | ≤ 1,5 | ≤ 1,5 | ABNT NBR NM 25:2003 |

Classes: (N) pozolanas naturais e artificiais; (C) cinzas volantes; (E) quaisquer pozolanas não contempladas nas classes N e C.

#### B) Requisitos físicos

Para os requisitos físicos, optou pela realização de dois dos ensaios propostos pela para ABNT NBR 12653:2015 (Tabela 3.11) e dos ensaios de Granulometria a laser e Superfície específica BET.

**Tabela 3.11: Requisitos Físicos segundo a ABNT NBR 12653:2015.**

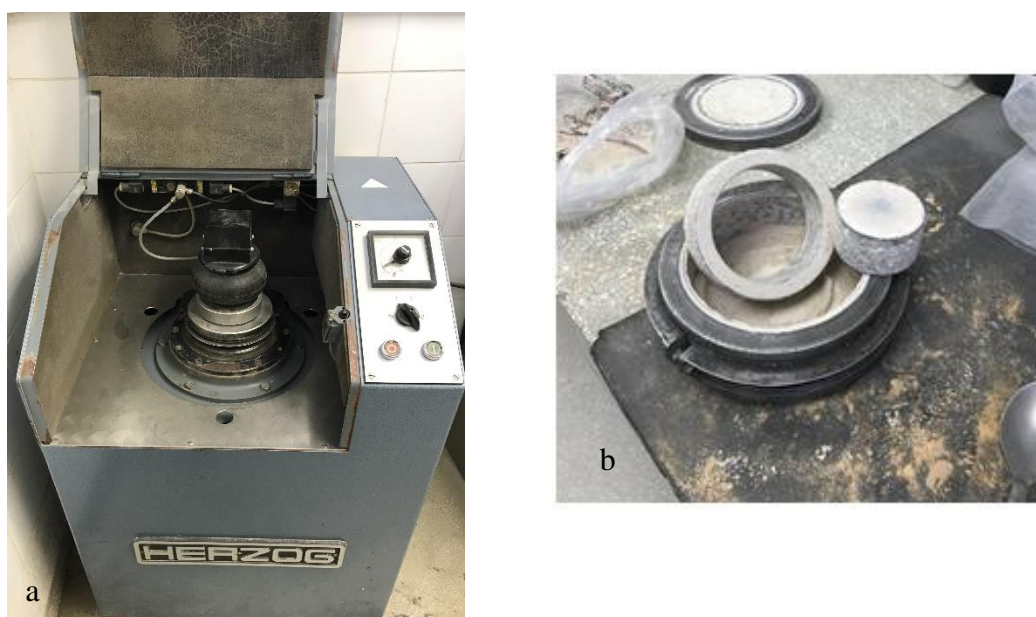
| Parâmetros Avaliativos (%)   | Classe do Material Pozolânico |      |      | Método de Ensaios     |
|--|-------------------------------|------|------|-----------------------|
|  | N                             | C    | E    |                       |
| Material retido na peneira 45µm  | < 20                          | < 20 | < 20 | ABNT NBR 15894-3:2010 |
| Índice de desempenho do cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle | ≥ 90                          | ≥ 90 | ≥ 90 | ABNT NBR 5752:2015    |

Classes: (N) pozolanas naturais e artificiais; (C) cinzas volantes; (E) quaisquer pozolanas não contempladas nas classes N e C.

Sabendo-se o quanto o requisito de finura é fundamental para a reatividade dos materiais, optou-se por moê-las e, assim, investigar a influência de diferentes finuras em seus desempenhos.

### ***Preparação dos materiais***

As moagens foram realizadas no Laboratório do Instituto de Geocronologia da UnB, no Moinho Pulverizador da Herzog, modelo HSM100, dotado de dispositivos revestidos de tungstênio, para evitar a contaminação das amostras. As amostras foram moídas em sete tempos distintos: 15s, 30s, 60s e 2min, 4min, 6min e 8 min. Em seguida, as mesmas foram submetidas ao ensaio de material retido na peneira 45 $\mu$ m, como estabelecido pela ABNT NBR 15894-3:2010 - Material retido na peneira 45 $\mu$ m. A Figura 3.10, apresenta imagem do moinho e partes da panela, em detalhe.



**Figura 3.10 \_ (a) Imagem do moinho de panelas, (b) detalhe das partes da panela.**

As amostras moídas nos tempos de 4min, 6min e 8min obtiveram resultados satisfatórios no ensaio de material retido na peneira 45 $\mu$ m. Sendo assim, a granulometria e a superfície específica das frações pulverulentas, nestes tempos de moagem, foram avaliadas através das técnicas de granulometria a laser e superfície específica BET, cujos procedimentos são apresentados em detalhes a seguir.

### ***Granulometria a laser***

Com o objetivo de determinar a distribuição granulométrica as frações pulverulentas, amostras foram enviadas ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O equipamento utilizado foi o granulômetro da marca CILAS<sup>o</sup>1180, que permite determinar a distribuição granulométrica do material analisado com granulometria variando de 0,04 $\mu$ m até 2500 $\mu$ m. Os ensaios foram realizados com amostras em torno de 10g, previamente peneiradas em malha de 500 $\mu$ m, o ultrassom foi utilizado por 60s, para garantir uma melhor dispersão das partículas. O ensaio seguiu as recomendações da norma EDANA<sup>o</sup>ERT 420.2-02:2002b.

### ***Superfície específica BET***

Com o objetivo de determinar a área superficial das frações FP1 e FP2, amostras dos materiais também foram enviadas ao LACER da UFRGS. Os equipamentos utilizados foram o porosímetro Nova 2200e, da Quantacrome, e o pentapicnômetro Pentapyc<sup>o</sup>5200e, também da Quantacrome. As preparações das amostras aconteceram conforme o manual de instrução do equipamento. Utilizou-se o ultrassom para garantir a dispersão das partículas por 60s.

Na sequência, as frações FP1 e FP2, moídas nos tempos de 4min, 6min e 8min, foram incorporadas em argamassas, chamadas também de “argamassas recicladas”. As argamassas foram confeccionadas com o intuito de avaliar o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) das “argamassas recicladas” (ARG<sub>FP1</sub> e ARG<sub>FP2</sub>), conforme a ABNT<sup>o</sup>NBR 5752:2015. Para fins de comparação, as frações sem moagem também foram testadas.

As argamassas confeccionadas para esta parte da pesquisa seguiram os padrões dos testes de cimento ABNT NBR 7215:1997 Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. A ABNT NBR 5752:2015 define que sejam substituídos 25% da massa de cimento Portland CP II-F-32 pelo material pulverulento que será avaliado. Sendo assim, para uma relação água/cimento de 0,48, foram utilizadas quatro frações granulométrica da areia, totalizando uma massa de 1860g, a massa do cimento foi de 468g, a massa do

material pulverulento foi 156g, a massa de água foi de 300g, além do aditivo superplastificante Tec Flow 530N, da marca Grace Construction Products.

Os teores de aditivo superplastificante utilizados nas misturas recicladas e os respectivos índices de consistência alcançados, são apresentados na Tabela 3.12.

**Tabela 3.12: Teores de aditivos e os respectivos índices de consistência das argamassas: ARG<sub>AN</sub>, ARG<sub>FP1</sub> e ARG<sub>FP2</sub>.**

| Tempo de moagem (min) | ARG <sub>AN</sub> |                     | ARG <sub>FP1</sub> |                     | ARG <sub>FP2</sub> |                     |
|-----------------------|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|                       | Consistência (mm) | Teor de aditivo (%) | Consistência (mm)  | Teor de aditivo (%) | Consistência (mm)  | Teor de aditivo (%) |
| 0                     | 140 ± 10          | -                   | 135                | 0,02                | 130                | 0,02                |
| 4                     | -                 | -                   | 130                | 0,02                | 130                | 0,02                |
| 6                     | -                 | -                   | 135                | 0,02                | 130                | 0,02                |
| 8                     | -                 | -                   | 135                | 0,02                | 130                | 0,02                |

Os índices de consistência das misturas recicladas ficaram dentro da faixa de (140 ± 10mm) em relação a mistura de referência (ARG<sub>AN</sub>), conforme ABNT NBR 5752:2014.

### 3.4.3 3º Etapa: Caracterização da estrutura porosa das argamassas recicladas

Com o objetivo de investigar sobre a capacidade de refinar poros das frações pulverulentas FP1 e FP2, pequenos corpos de prova das argamassas recicladas (ARG<sub>FP1</sub> e ARG<sub>FP2</sub>), com idade de 28 dias e contendo as frações pulverulentas moídas nos tempos de: 4min, 6 min e 8min, foram submetidas à paralisação do processo de hidratação do cimento, para posterior realização do ensaio de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM). Os ensaios também foram realizados no Laboratório de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Campus Uvaranas.

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Foi realizada estatística descritiva dos dados das Partes 1 e 2 do trabalho. Na Parte 1 foram testados os parâmetros físicos: massa unitária, absorção de água e massa específica. Na Parte 2 foram testados os parâmetros físico-mecânicos: resistência à tração, resistência à compressão, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. As análises da Parte 1 foram realizadas em duplicada, portanto quatro valores foram confrontados e na Parte 2, seis valores foram confrontados, pois cada ensaio gerou três resultados.

Com o intuito de verificar as diferenças significativas entre os dados dos parâmetros citados, foram realizados testes de duas variáveis, num estudo de estatística Bivariada.

Contando com o auxílio da ferramenta computacional *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versão 23.0, aplicou-se o Teste de Levene e o Teste t entre amostras independentes. Segundo Hair *et al.* (2009); Martinez e Ferreira (2010); Ribas e Viera (2011), dois procedimentos estatísticos devem ser analisados: testar se as amostras têm variâncias iguais, ou seja, testar a homogeneidade da variância (Teste de Levene); e testar a igualdade de médias (Teste t). Um resumo das possibilidades de resultados se encontram na Tabela 3.13.

**Tabela 3.13: Possíveis resultados para o Teste t de amostras independentes e Teste Levene (MIRANDA, 2018).**

| No SPSS   | Teste Levene | Teste T                          | Resultado   |
|---|--------------|----------------------------------|---|
| Analisar colunas, variâncias iguais assumidas     | $p > 0,05$   | $p < 0,05$                       | Existe diferença entre as médias dos dois grupos.     |
|   | $p > 0,05$   | $p > 0,05$                       | Não existe diferença entre as médias dos dois grupos. |
| Analisar colunas, variâncias iguais não assumidas | $p < 0,05$   | $p < 0,05$<br>IC não contêm zero | Existe diferença entre as médias dos dois grupos.     |
|   | $p < 0,05$   | $p > 0,05$<br>IC contêm zero     | Não existe diferença entre as médias dos dois grupos. |

De acordo com a Tabela 3.13 se o Teste de Levene indicar que as variâncias são diferentes nos dois grupos ( $p < 0,05$ ), então se pressupõem variâncias diferentes e o cálculo do Teste t é aplicado como complemento, para a análise do Intervalo de Confiança (IC) da Diferença. Se o IC para a diferença média contiver 0, os resultados não são significativos no nível de significância escolhido, se não contiver, os resultados são significativos.

Os testes foram aplicados confrontando as variáveis em grupos dois a dois assim:

- Areia reciclada (AR1) com Areia reciclada (AR1);
- Areia reciclada (AR2) com Areia reciclada (AR2);
- Areia de referência (AN) com Areia reciclada (AR1);
- Areia de referência (AN) com Areia reciclada (AR2);
- Areia reciclada (AR1) com Areia reciclada (AR2);
- Argamassa padrão ( $ARG_{AN}$ ) com Argamassa reciclada ( $ARG_{AR1}$ );
- Argamassa padrão ( $ARG_{AN}$ ) com Argamassa reciclada ( $ARG_{AR2}$ );
- Argamassa reciclada ( $ARG_{AR1}$ ) com Argamassa reciclada ( $ARG_{AR2}$ ).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A etapa experimental do trabalho foi dividida em quatro partes, cujos resultados serão apresentados e simultaneamente discutidos neste capítulo. Na Parte 1 propõe-se a caracterização das frações granulométricas das areias recicladas; na sequência, na Parte 2 discute-se a interferência das frações granulométricas das areias recicladas nas propriedades físico-mecânicas de argamassas recicladas. Já na Parte 3 apresenta-se e discute-se as análises microestruturais das argamassas com 100% de areia reciclada. Por fim, na Parte 4 apresenta-se os resultados e discussão sobre o estudo das frações pulverulentas das areias recicladas.

### **4.1 PARTE 1: CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS RECICLADAS**

Nesta parte do trabalho, pretende-se somar informações aos estudos atuais da área, através do conhecimento das características físicas, químicas e mineralógicas das areias recicladas AR1 e AR2, investigando como estas características podem variar em função da fração granulométrica analisada. Como a 1ª Etapa (da coleta à redução dos materiais), não gerou resultados, serão apresentados os resultados e realizadas as discussões das etapas subsequentes: 2ª, 3ª e 4ª.

#### **4.1.1 2º Etapa: Ensaio de cumprimento dos requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural**

As Tabelas 4.1 e 4.2 a seguir, apresentam os resultados dos ensaios de verificação do atendimento aos requisitos de agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural, realizados nas areias AR1 e AR2.



**Tabela 4.1: Ensaios realizados na areia AR1, para cumprimento dos requisitos da ABNT<sup>o</sup>NRB<sup>o</sup>15116:2004 como ARC.**

| <b>Características Físicas (%)</b>                        | <b>Limites</b> | <b>Fração grossa</b> | <b>Fração média grossa</b> | <b>Fração média fina</b> | <b>Fração fina</b> | <b>Areia composta</b> | <b>Cumprimento dos requisitos</b> |
|---|----------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Absorção de água  | ≤ 12           | 5,4                  | 5,2                        | 2,9                      | 1,7                | 2,8                   | ✓                                 |
| Contaminantes: cloretos e sulfatos (1)                    | 1              | 1,9                  | -                          | -                        | -                  | -                     | ✗                                 |
| Contaminantes: materiais não minerais (2)                 | 2              | -                    | -                          | 0,4                      | -                  | -                     | ✓                                 |
| Contaminantes: torrões de argila e materiais friáveis (3) | 2              | 1,5                  | -                          | -                        | -                  | -                     | ✓                                 |
| Teor Total contaminantes (1+2+3)                          | 3              | 3,4                  | -                          | -                        | -                  | -                     | ✗                                 |
| Teor de material passante na malha 75 µm                  | ≤ 15           | 1,0                  | 1,0                        | 1,0                      | 7,3                | 1,4                   | ✓                                 |

**Observações:** o traço (-) na tabela significa que não se aplica o ensaio para aquela fração específica, o símbolo (✓) significa que cumpriu com o requisito e o símbolo (✗) significa que não cumpriu o requisito.

**Tabela 4.2: Ensaios realizados na areia AR2, para cumprimento dos requisitos da ABNT<sup>o</sup>NRB<sup>o</sup>15116:2004 como ARC.**

| <b>Características Físicas (%)</b>                        | <b>Limites</b> | <b>Fração grossa</b> | <b>Fração média grossa</b> | <b>Fração média fina</b> | <b>Fração fina</b> | <b>Areia composta</b> | <b>Cumprimento dos requisitos</b> |
|---|----------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Absorção de água  | ≤ 12           | 1,1                  | 3,9                        | 3,7                      | 3,8                | 3,0                   | ✓                                 |
| Contaminantes: cloretos e sulfatos (1)                    | 1              | 2,65                 | -                          | -                        | -                  | -                     | ✗                                 |
| Contaminantes: materiais não minerais (2)                 | 2              |                      |                            | 0,10                     |                    | -                     | ✓                                 |
| Contaminantes: torrões de argila e materiais friáveis (3) | 2              | 1,5                  | -                          | -                        | -                  | -                     | ✓                                 |
| Teor total contaminantes (1+2+3)                          | 3              | 4,25                 |                            |                          |                    | -                     | ✗                                 |
| Teor de material passante na malha 75 µm                  | ≤ 15           | 1,2                  | 2,9                        | 3,1                      | 7,8                | 1,2                   | ✓                                 |

**Observações:** o traço (-) na tabela significa que não se aplica o ensaio para aquela fração específica, o símbolo (✓) significa que cumpriu com o requisito e o símbolo (✗) significa que não cumpriu o requisito.

Observa-se que areias recicladas atenderam aos requisitos da ABNT NBR 15116:2004 para os parâmetros absorção de água e teor de material passante na peneira de 75 µm (Tabelas 4.1 e 4.2). Em relação às taxas de absorção de água, dentre os países que permitem o uso dos agregados miúdos reciclados, a Suíça e a Dinamarca não avaliam este parâmetro e o Japão permite até 9% de absorção de água para agregado misto

(GONÇALVES e DE BRITO, 2010). Logo, as areias recicladas AR1 e AR2 também atendem ao percentual estabelecido pelas normas japonesas. Em relação ao material passante na malha 75 µm, a ASTM C-33 (2003), recomenda porcentagens inferiores a 7% para os agregados miúdos (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2003). Logo, com exceção das frações finas, as areias AR1 e AR2 cumpriram os requisitos da norma americana. Ressalta-se que a Suíça, Japão e Dinamarca não avaliam este parâmetro.

Contudo, as areias AR1 e AR2 não atenderam aos requisitos “Contaminantes: cloreto+sulfato”. Por este motivo, consequentemente extrapolaram o requisito “Teor total de contaminantes” (Tabelas 4.1 e 4.2). A ABNT NBR 15116:2004 limita a presença de no máximo 1% de cloreto e 1% de sulfato na amostra, sendo que a soma dos dois contaminantes pode ser de no máximo 1%. Como os ensaios de bancada, realizados de acordo com a ABNT NBR 9917:2009, não detectaram a presença destes contaminantes, optou-se por realizar uma nova verificação, utilizando a técnica de cromatografia iônica. Os resultados apontaram taxas de cloretos abaixo de 1% nas duas areias, sendo 0,14% para a AR1 e 0,25% para a AR2, porém apresentaram taxas de contaminação por sulfato de 1,8% e 2,4%, nas amostras AR1 e AR2, respectivamente. Logo, os somatórios de contaminantes: cloreto+sulfato e de teor de contaminantes total ficaram acima do máximo permitido pela ABNT NBR 15116:2004 (Tabelas 4.1 e 4.2).

A amostra AR2, que tem origem no beneficiamento de corpos de prova de concreto (RC), apresenta 25% a mais de sulfato que a amostra AR1 da usina de RCD. Uma hipótese para a taxa superior de sulfato na areia AR2 pode ser a presença do mineral gipso ( $\text{CaSO}_4$ ), que, segundo De Juan e Gutiérrez (2009) e De Schepper *et al.* (2017), pode levar a expansões de sulfato. As análises de DRX, que serão apresentadas adiante (item 4.1.3), apontam presença considerável deste mineral em todas as frações de AR2. Contudo, é preciso ressaltar que o gipso faz parte da composição do cimento \_ que dependendo do tipo, pode conter até 5% de gesso \_ logo, parte do gipso detectado também pode se referir à composição do próprio cimento existente no resíduo.

Por outro lado, não foi detectada a presença de gipso nas amostras das frações da areia AR1. Acredita-se que este fato se deva à diversidade de origens dos RCD que compõem esta areia, pois, além do concreto, podem estar presentes materiais cerâmicos, por exemplo. A diversidade de outros materiais presentes nesta areia pode ter reduzido a

concentração de gipso, dificultando a sua detecção pela análise de DRX. Sendo assim, uma hipótese que surge é a da contaminação externa, por via hídrica. Segundo Chernicharo (2007), os sulfatos podem se encontrar diluídos em água, por exemplo, no esgoto sanitário ou em efluentes industriais. Como os RCD da areia AR1 advêm de diversas fontes do DF, existe a chance de o material ter se contaminado durante o período da sua aplicação original ou até mesmo durante o seu armazenamento.

Conforme apresentado anteriormente no item 2.3.4, Silva, De Brito e Dhir (2014) acreditam que a presença de sulfato deve ser discutida caso a caso, pois, segundo os autores, estabelecer um limite muito estreito para sua presença poderia desnecessariamente excluir o uso das areias recicladas da maioria das especificações. Mas *et al.* (2012) por exemplo, estudaram areias recicladas contaminadas com sulfato na produção de argamassas, utilizando cimento convencional. Esses pesquisadores concluíram que teores de sulfato de até 2,9% não comprometeram a durabilidade das argamassas. Como as areias deste estudo apresentaram taxa de sulfato abaixo de 2,9%, adota-se a premissa de que este contaminante não influenciará negativamente na durabilidade das argamassas confeccionadas com areia AR1 e AR2. Todavia, não há como constatar tal afirmação, pois a durabilidade não foi objeto desta pesquisa.

Logo os resultados apresentados mostraram que as areias recicladas não se classificaram como agregados reciclados de concreto (ARC) (Tabelas 4.1 e 4.2) e nem como agregados reciclados misto (ARM) (Tabela 2.1, capítulo 2), pois a ABNT NBR 15116:2004 limita o máximo de 1% de teor de sulfato também para o ARM. Sendo assim, convencionou-se as areias recicladas deste estudo como: AR1 de RCD e AR2 de RC.

Em relação ao ensaio de teor de material passante na peneira de 75  $\mu\text{m}$  e as taxas de absorção de água dos agregados reciclados, no trabalho de Miranda *et al.* (2013), os pesquisadores correlacionaram a elevação do teor de finos, presentes em areias recicladas, ao aumento das taxas de absorção de água das areias. Comparando os resultados de absorção de água e o teor de material passante na peneira de 75  $\mu\text{m}$  das areias recicladas (AR1 e AR2), constata-se que a priori o teor de finos não influenciou diretamente na capacidade de absorção das areias recicladas. Observa-se nas Tabelas 4.1 e 4.2, que os percentuais de finos nas frações grossa e fina das duas areias são praticamente idênticos, porém as taxas de absorção de água nestas frações são bem distintas. Na fração grossa, a

areia AR1 apresenta uma taxa de absorção de água 68% maior que a da areia AR2, e na fração fina a areia AR2, detectou-se uma taxa de absorção de água 56% maior que a areia AR1.

Com o intuito de confirmar que de fato o teor de finos não influenciaria diretamente na capacidade de absorção das areias recicladas, ensaios de absorção de água e teor de material passante na malha 75 µm (teor de finos) foram novamente realizados. A areia AR1 foi submetida a nova lavagem em laboratório (ver item 3.1.1 D) para realização dos ensaios e as frações da areia AR2 sem lavagem, também foram ensaiadas. A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos ensaios realizados antes da lavagem em laboratório (A L) e depois da lavagem em laboratório (D L).

**Tabela 4.3: Ensaios realizados nas areias AR1 e AR2, antes e depois de submetidas às lavagens.**

| Areias | Características Físicas (%)              | Fração grossa |     | Fração média grossa |     | Fração média fina |     | Fração fina |     | Areia composta |     |
|--------|--|---------------|-----|---------------------|-----|-------------------|-----|-------------|-----|----------------|-----|
|        |  | AL            | DL  | AL                  | DL  | AL                | DL  | AL          | DL  | AL             | DL  |
| AR1    | Absorção de água                         | 5,4           | 5,5 | 5,2                 | 5,2 | 2,9               | 1,9 | 1,7         | 2,0 | 2,8            | 3,0 |
|        | Teor de material passante na malha 75 µm | 1,0           | 0,1 | 1,0                 | 0,2 | 1,0               | 0,2 | 7,3         | 0,3 | 1,4            | 0,2 |
| AR2    | Absorção de água                         | 3,9           | 1,1 | 2,6                 | 3,9 | 5,0               | 3,7 | 3,8         | 3,8 | 3,2            | 3,0 |
|        | Teor de material passante na malha 75 µm | 4,4           | 1,2 | 8,3                 | 2,9 | 13,7              | 3,1 | 17,8        | 7,8 | 16,0           | 1,2 |

**Observação:** antes da lavagem (A.L), depois da lavagem (D.P).

Comparando os resultados dos ensaios com a areia AR1, antes e após a lavagem, o teor de material passante na peneira 75 µm apresentou quedas de mais de 90% em todas as condições analisadas. Em relação às taxas de absorção de água, com exceção da fração média fina, praticamente não houve variação antes e após a lavagem (Tabela 4.3). Em relação aos resultados dos ensaios com a areia AR2, o teor de material passante na peneira 75 µm, apresentou quedas de 73% na fração grossa até 56% para a fração fina. Em relação às taxas de absorção de água, apenas a fração grossa apresentou queda expressiva após a lavagem, em torno de 70% (Tabela 4.3). Logo, os resultados apresentados confirmam que o teor de finos, de forma geral, não influenciou diretamente na capacidade de absorção

das areias recicladas. Sendo assim, outros fatores como a presença de pasta de cimento aderida poderia estar influenciando nas taxas de absorção de água das areias AR1 e AR2.

Se por um lado alguns estudos (BRAGA, DE BRITO e VEIGA, 2012; ELAQRA, 2015) mostram que os resíduos pulverulentos (finos) de RCD e RC, podem trazer melhoras às resistências mecânicas de argamassas, devido ao feito filer e ou a presença de compostos não hidratados de cimento. Por outro lado, estudos (MIRANDA *et al.*, 2013; ROSA, 2013; MALTA *et al.*, 2014) mostram que o aumento da presença de finos eleva as taxas de absorção de água das areias recicladas, modificando o teor eficaz de água da mistura e afetando as propriedades do material cimentício fresco e endurecido.

Sendo assim, apesar dos resultados apresentados (Tabela 4.3) não mostrarem relação direta entre o teor de finos e a absorção de água das areias AR1 e AR2, ocorreram quedas expressivas nas taxas de finos das areias recicladas após as lavagens; o que mostra a importância da lavagem para o cumprimento dos requisitos de finura regulamentados pela ABNT NRB 15116:2004.

#### **4.1.2 3º Etapa: Ensaios de caracterização física das areias**

A seguir serão apresentados e comparados os resultados dos ensaios de massa unitária, absorção de água e massa específica das areias AN, AR1 e AR2. Também serão apresentados neste subitem, os registros fotográficos das frações granulométricas das areias, realizados por lupa eletrônica, e as análises realizadas no MEV. No Apêndice A (Tabelas A1 a A5), se encontram os resultados de todos os ensaios físicos realizados na areia AN e nas areias recicladas, antes e após as lavagens em laboratório.

##### **A) Comportamento das frações granulométricas das areias**

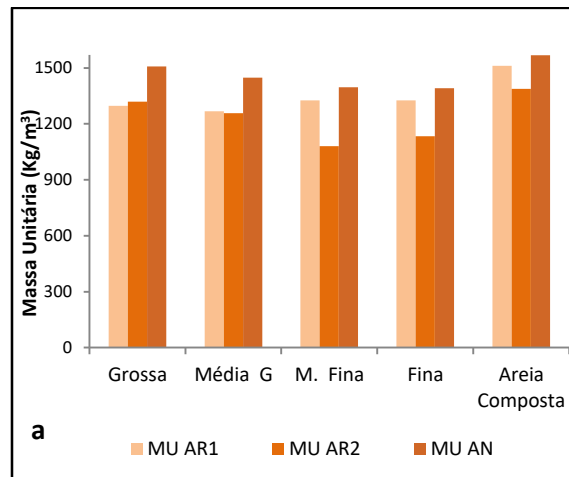
Os resultados dos ensaios de caracterização física das areias AN, AR1 e AR2 estão apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2. Os resultados dos testes do SPSS, referentes a estes ensaios, estão apresentados nas Tabelas A6 à A17 do Apêndice A deste documento. No Apêndice A também se encontram as tabelas resumo dos resultados dos testes estatísticos que confrontaram: as condições de estudo das frações da areia AR1 (Tabela A18); as

condições de estudo das frações da areia AR2 (Tabela A19) e as condições de estudo da areia AR1 com a areia AR2 e delas com a areia de referência (Tabela A20).

A Tabela 4.4 apresenta os resultados de fator de empacotamento dos grãos das areias AN, AR1 e AR2, na condição areia composta. Na sequência, a Figura 4.3 apresenta gráficos de dispersão dos valores de massa específica *versus* absorção de água: das condições de estudo da areia AR1, das condições de estudo da areia AR2 e de dados coletados na literatura. Por fim, a Tabela 4.5 traz um apanhado literário de resultados de massa específica aparente, absorção de água e massa unitária.

Após a constatação estatística de que a maior parte das médias dos valores de absorção de água e massa específica, das frações grossa e média grossa das areias recicladas, pertenceriam a uma mesma população, e que as médias das frações média fina e fina pertenceriam a outra população, optou-se pela separação das areias recicladas em dois grupos de frações. Um grupo denominado de “frações grossas”, e outro grupo denominado de “frações finas” (Apêndese A, Tabela A19). Em relação à característica de massa unitária (Apêndese A, Tabela A18), apesar dos resultados estatísticos apresentarem significância estatística para parte das combinações testadas, optou-se também pela junção em dois grupos de frações. Para a condição “areia composta”, constatou-se que a maior parte das médias dos valores apresentam significância estatística em relação às “frações grossas” e às “frações finas”. Sendo assim, a apresentação e a discussão dos resultados desta parte do trabalho seguirão, em vários momentos, este formato (Apêndese A, Tabelas A18 e A19).

A Figura 4.1 a seguir, apresenta os resultados dos ensaios de massa unitária das areias AN, AR1 e AR2 e a Tabela 4.4, na sequência, apresenta o fator de empacotamento dos grãos das areias na condição areia composta.



**Figura 4.1 \_ Massa Unitária das condições estudadas das areias AN, AR1 e AR2**

**Tabela 4.4: Fator de empacotamento dos grãos das areias na condição areia composta.**

| $E_0$ (%) | Areia Composta |
|-----------|----------------|
| AN        | 68,2           |
| AR1       | 73,7           |
| AR2       | 65,4           |

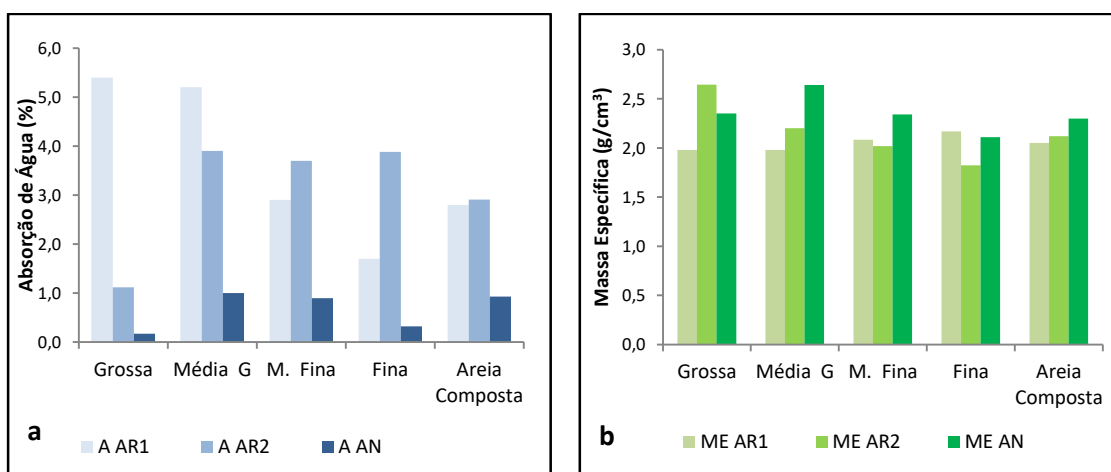
Analisando as massas unitárias das quatro frações das areias AR1 e AR2 (Figura 4.1), observa-se que há uma tendência de crescimento de 3% dos valores de massa unitária, das “frações grossas” para as “frações finas” da areia AR1. Ao contrário na areia AR2, houve diminuição dos valores de massa unitária em cerca de 14% das “frações grossas” para as “frações finas”. Na condição areia composta, tanto a areia AR1, quanto a areia AR2, apresentam o maior valor de massa unitária dentre as condições analisadas (Figura 4.1). Comparando as areias recicladas com a de referência, a areia AN apresenta maiores valores de massa unitária que as areias recicladas, em todas as condições testadas (Figura 4.1).

No que se refere à massa unitária e ao fator de empacotamento das areias (AN, AR1 e AR2) na condição areia composta, observa-se que apesar da areia AR1 apresentar fator de empacotamento 7% maior que a areia AN, ela apresenta massa unitária pouco menor que a areia de referência, cerca de 4% (Figura 4.1, Tabela 4.4). Uma hipótese para este resultado, é que apesar da forma irregular das partículas da areia AR1 ter favorecido um melhor arranjo desta areia, a presença da pasta de cimento aderida à superfície (mais porosa e mais leve), fez com que a massa unitária da areia AR1 fosse pouco menor que da areia AN.

Comparando as duas areias recicladas (Figura 4.1), não há diferença estatística significativa entre as massas unitárias das “frações grossas”, já para as “frações finas”; a areia AR1 obteve valor de massa unitária, em média 16,5% maiores que a areia AR2. Em relação à areia composta, a areia AR1 obteve valores de massa unitária e fator de empacotamento dos grãos 8% e 11% maiores que a areia AR2, respectivamente.

Sendo assim, em relação às características apresentadas acima, a areia AR1 se mostra, de forma geral, mais densa (nas “frações finas e condição areia composta) e com granulometria mais contínua que a areia AR2.

A Figura 4.2 apresenta os resultados dos ensaios de: absorção de água e massa específica das areias AN, AR1 e AR2.



**Figura 4.2 \_ Condições estudadas das areias AN, AR1 e AR2: (a) Absorção de Água e (b) Massa Específica.**

Analisando as quatro frações da areia AR1 (Figura 4.2), observa-se que as “frações grossas” têm taxas de absorção de água cerca de 50% maior que as “frações finas” (Figura 4.2 a). Em relação à massa específica (Figura 4.2 b), as “frações grossas” tendem a apresentar menores valores de massa específica que as “frações finas”, em torno de 7% a menos.

Analisando ainda areia AR1 na condição areia composta, a taxa de absorção de água (Figura 4.2 a) apresenta-se entre as obtidas para as “frações grossas” e para as “frações



finas”. Em relação à massa específica, os resultados não apresentam diferenças com significância estatística (Figura 4.2 b).

Em relação à areia AR2, observa-se que a fração grossa obteve uma taxa de absorção de água de 1,12% e as demais frações: média grossa, média fina e fina, apresentam taxas de absorção de água em torno 3,8%, um crescimento de 3,5 vezes em relação à fração grossa (Figura 4.2<sup>a</sup>). Em relação a massa específica, observa-se uma diminuição dos valores das “frações grossas” em relação as “frações finas”, em torno de 21% (Figura 4.2b).

Analisando a areia AR2 na condição areia composta, observa-se que assim como na areia AR1, a taxa de absorção de água se mantém entre as “frações grossas” e as “frações finas” e em relação à massa específica, assim como na areia AR1, também não existem diferenças estatisticamente significativas (Figura 4.2).

Em relação aos resultados da areia AN, esta apresentou valores de absorção de água que não chegaram a 1%, os resultados mostram que estatisticamente a areia de referência absorve menos água que as areias recicladas (Figura 4.2 a). Em relação aos valores de massa específica (Figura 4.2 b), não há diferença estatística significativa entre as areias recicladas e a areia de referência; com exceção para as “frações grossas” da areia AR1, que apresentam menores valores de massa específica em relação a areia AN, sendo percentualmente de diferença de 16,5% na fração grossa e 23% na fração média grossa.

Mesmo que de forma geral as diferenças entre as massas específicas das areias recicladas e de referência não apresentem significância estatística, nota-se que as areias recicladas apresentam valores de massa específica menores que a areia de referência (Figura 4.2b). As “frações grossas” da areia AR1 e AR2 apresentam massa específica de 20% e 7,5% em média menores que a areia AN e as “frações finas” da areia AR1 e AR2 apresentam massa específica 6,5% e 13,5% em média menor que a areia AN (Figura 4.2b). Na condição areia composta, a diferença é de 8,6% nas duas areias (Figura 4.2b). Hansen e Narud (1985) mostraram que os agregados reciclados costumam apresentar massas específica de 5 a 10% menores que as dos agregados naturais, logo os valores de massa específica das areias recicladas e de referência deste estudo apresentaram-se de forma geral dentro da faixa apresentada pelos pesquisadores.

Comparando as taxas de absorção de água das areias recicladas (AR1 e AR2), observa-se que a areia AR1 absorve 79% a mais de água que a areia AR2 na fração grossa, caindo para 25% na fração média grossa. Nas “frações finas” o comportamento se inverte, sendo que na fração média fina, as taxas de absorção de água são estatisticamente semelhantes e na fração fina, a areia AR2 chega a absorver 56% a mais de água que a areia AR1. Na condição areia composta, as areias recicladas não apresentam diferenças estatisticamente significativas.

Por fim, vê-se na Figura 4.2 b, que a areia AR1 apresenta valor de massa específica 23% menor que a areia AR2 na fração grossa, e 9% menor na fração média grossa. Nas frações média fina, fina e condição areia composta as areias recicladas não apresentam diferenças estatisticamente significativas.

Logo, as “frações grossas” da areia AR1, e as “frações finas” da areia AR2, apresentam os menores valores de massa específica e as maiores taxas de absorção de água; sugerindo que há maior presença de pasta de cimento endurecida nestas frações.

Ainda em relação aos parâmetros massa específica e absorção de água, quando se analisa todas as condições estudadas da areia AR1 e da AR2, observa-se uma tendência de comportamento. A Figura 4.3 a, b a seguir, mostra que os valores de massa específica *versus* absorção de água das areias recicladas, são em geral inversamente proporcionais para todas as condições estudadas.

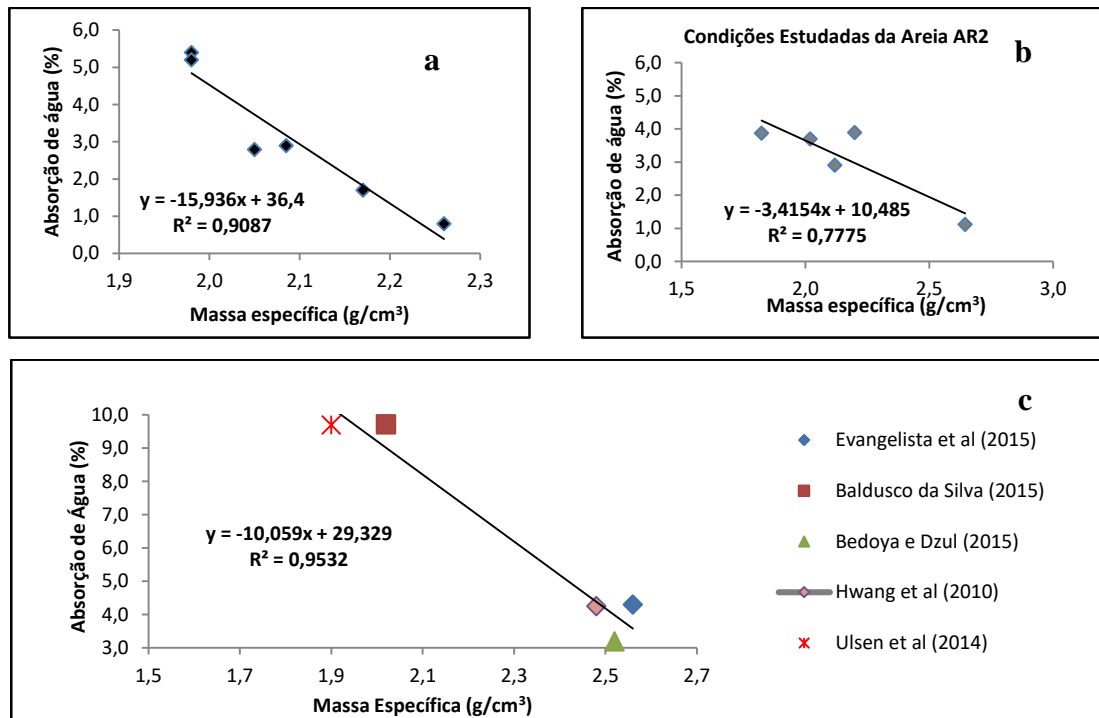


Figura 4.3 \_ massa específica *versus* absorção de água: (a) condições de estudo da areia AR1, (b) condições de estudo da areia AR2, (c) dados coletados na literatura.

Sendo assim, as areias recicladas deste estudo, se comportam como as areias recicladas estudadas pelos pesquisadores Hwang *et al.* (2010); Ulsen *et al.* (2014); Evangelista *et al.* (2015); Balduino Da Silva *et al.* (2015), cujos resultados de massa específica e de absorção de água, estão plotados no gráfico de dispersão apresentado na Figura 4.3 c. Tal comportamento mostra que se por um lado as frações das areias recicladas AR1 e AR2 apresentam diferenças entre as “frações grossas” e as “frações finas”, por outro, observa-se uma homogeneidade de comportamento, quando as mesmas são analisadas em sua totalidade.

Apesar dos agregados reciclados apresentarem grande variabilidade, vê-se a importância de se comparar os resultados da presente pesquisa, com os de outros pesquisadores. Sendo assim, a Tabela 4.5 na sequência, apresenta um apanhado literário com resultados dos ensaios de: massa específica, absorção de água e massa unitária. Contudo, as comparações serão feitas de forma genérica, uma vez que se tratam de materiais heterogêneos e que muitas vezes os ensaios foram realizados em condições metodológicas distintas as desta pesquisa.

**Tabela 4.5: Apanhado literário de resultados de: massa específica aparente ( $\text{g/cm}^3$ ), absorção de água (%) e massa unitária ( $\text{kg/m}^3$ ).**

| Pesquisadores                           | Origem das areias | Massa específica aparente ( $\text{g/cm}^3$ )                 | Absorção de água (%)        | Massa unitária ( $\text{Kg/m}^3$ )                 |
|---|-------------------|---|-----------------------------|--|
| Katz (2002)                             | RC                | 2,2   | 12,7                        | 1.321,0  |
| Evangelista e De Brito (2010)           | RC                | 1,9   | 13,1                        | 1.234,0  |
| Evangelista e De Brito (2014)           | RC                | 2,6-2,6   | 1,3 e 13,1                  | -  |
| Evangelista <i>et al.</i> (2015)        | RC                | 2,5   | 10,4                        | 1.330,0  |
| Girardi; Martins Filho e Carasek (2017) | RC                | 2,5   | 16,6                        | 1.280,0  |
|   | RC                | 2,7   | 12,0                        | 1.460,0  |
| Corinaldesi (2009)                      | RCD               | -   | 10,0                        | -  |
| Malta <i>et al.</i> (2013)              | RCD               | 2,5   | -                           | 1.160,0  |
| Hwang <i>et al.</i> (2013)              | RCD               | 2,5   | 4,2                         | -  |
| Martínez <i>et al.</i> (2013)           | RCD               | 2,2   | 7,5                         | 1.280,0  |
|   | RCD               | 1,9   | 4,7                         | 1.150,0  |
|   | RCD               | 1,9   | 6,8                         | 1.160,0  |
|   | RCD               | 2,0   | 9,0                         | 1.310,0  |
| Ulsen <i>et al.</i> (2014)              | RCD               | 1,9-2,2   | 9,7                         | -  |
|   | RCD               | 2,2-2,5   | 6,3                         | -  |
|   | RCD               | > 2,5   | 1,0                         | -  |
| Rodrigues e Fucale (2014)               | RCD               | 2,5   | 10,0                        | -  |
| Bedoya e Dzul (2015)                    | RCD               | 2,5   | 3,2                         | -  |
| Balduco da Silva <i>et al.</i> (2015)   | RCD               | 2,0   | 9,7                         | -  |
| <b>Valores médios deste trabalho</b>    |                   | <b>Massa específica aparente (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b> | <b>Absorção de água (%)</b> | <b>Massa Unitária (<math>\text{Kg/m}^3</math>)</b> |
| Areia AR1                               | RCD               | 2,0   | 3,8                         | 1.300,0  |
| Areia AR2                               | RC                | 2,1   | 3,2                         | 1.197,0  |

**Observação:** RC: areia originada de corpos de prova de concreto beneficiados em laboratório; RCD: “fração cinza” da areia de usina.

Observando as massas específicas dos trabalhos apresentados na Tabela 4.5, nota-se que os valores variam praticamente dentro da mesma faixa, de  $1,9 \text{ g/cm}^3$  à  $2,7 \text{ g/cm}^3$  para as areias de RC e de  $1,9 \text{ g/cm}^3$  à  $2,5 \text{ g/cm}^3$  para as areias de RCD. Comparando os resultados da literatura aos das areias recicladas deste estudo, observa-se que elas apresentam valores dentro das faixas apresentadas pela literatura, sendo que estes valores são praticamente idênticos,  $2 \text{ g/cm}^3$  e  $2,1 \text{ g/cm}^3$  para AR1 e AR2, respectivamente. Tais resultados confirmam que a origem dos resíduos pouco interfere na massa específica final dos agregados reciclados, constatado por Hansen (1992).

A heterogeneidade das areias recicladas pode ser observada com mais clareza, analisando a variação dos valores de absorção de água dos trabalhos apresentados na Tabela 4.5. Observa-se que as areias de RCD, apresentam taxas de absorção de água que variaram de 1% a 12,0%, e as areias de RC de 1,3% a 16,6%, com variações de cerca de 92% entre o menor e o maior valor, tanto das areias de RCD, quanto das areias de RC. Apesar da heterogeneidade, parece que a origem dos resíduos também pouco interfere nas absorções de água dos agregados reciclados, que apresentam faixas de variação muito parecidas.

Em relação a este estudo, as taxas médias de absorção de água das areias AR1 e AR2, são de 3,8% e 3,2% respectivamente, ficando assim no limite inferior das faixas apresentadas pela literatura (Tabela 4.5). Uma hipótese para as menores taxas de absorção de água das areias AR1 e AR2, pode estar na maior presença da fase mineral nestas areias. A maior presença da fase mineral (agregado natural) se deve por sua vez, a própria natureza dos materiais de origem, como também à perda de pasta de cimento aderida aos grãos (“liberação da fase mineral”), durante as etapas de britagens.

Outra hipótese, se refere ao método adotado para determinação do parâmetro absorção de água, que segundo Leite (2001), Carrijo (2005) influenciaria de forma significativa nos resultados, inclusive apontado pelos pesquisadores como um dos fatores responsáveis pela variabilidade dos resultados encontrados na literatura. Leite (2001) relata que como o material é mais poroso, ao secá-lo até a condição saturada superfície seca (SSS) (ABNT NM-30:2001), corre-se o risco de não só a água superficial ser removida durante o processo, mas também a água dos poros, logo abaixo da superfície do grão. Logo, o método adotado (ABNT NM-30:2001) pode ter subestimado os valores de absorção de água encontrados neste estudo, caso os pesquisadores tenham adotado outro método para determinação do parâmetro em questão.

Em relação aos valores de massa unitária, como eles dependem não só da densidade do material, mas também da forma, observam-se que os dados da literatura apresentam diferenças entre as faixas de variação, dependendo da origem do resíduo, com variação entre o menor e o maior valor, de 7,5% para as areias de RC; saltando para 21% para as areias de RCD (Tabela 4.5). As massas unitárias médias das areias AR1 e AR2 foram de 1.300 kg/m<sup>3</sup> e 1.197 kg/m<sup>3</sup> respectivamente, dentro da faixa de valores encontrados na literatura (Tabela 4.5).

Com base nas comparações apresentadas, observa-se que as areias recicladas apresentam massa específica e massas unitárias menores que a areia de referência (AN) e taxas de absorção de água maiores que da areia de referência, como era esperado (Figuras: 4.1 e 4.2). De acordo com Pacheco-Torgal *et al.* (2013) e Malta *et al.* (2014), menores valores de massa específica e massa unitária em agregados reciclados, significam presença de pasta de cimento. A presença de pasta de cimento, por sua vez levará a maiores taxas de absorção de água por parte destes agregados. Como as areias recicladas AR1 e AR2, são

provenientes de britagem de RCD com presença de concreto e de RC, é esperado a presença pasta de cimento neste material, justificando tais resultados. A presença de pasta de cimento pode influenciar negativamente nas propriedades físico-mecânicas de argamassas e concretos, pois segundo Leite e Monteiro (2016), a antiga zona de transição, faria com que a microestrutura do material cimentício se tornasse mais frágil, devido à maior porosidade desta região. A maior porosidade demandaria por uma maior quantidade de água, que acabaria por elevar a relação água/cimento naquela região, fazendo com que ela se tornasse frágil, ou menos resistente.

A Tabela 4.6 apresenta uma síntese do comportamento das areias recicladas com relação aos parâmetros estudados.

**Tabela 4.6: Síntese do comportamento das areias recicladas.**

| <b>Parâmetros</b>      | <b>“frações grossas”</b> | <b>“frações finas”</b> | <b>areia composta</b> |
|------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|
| massa unitária         | AR1=AR2                  | AR1>AR2                | AR1>AR2               |
| fator de empacotamento | -                        | -                      | AR1>AR2               |
| massa específica       | AR1<AR2                  | AR1>AR2                | AR1=AR2               |
| absorção de água       | AR1>AR2                  | AR1<AR2                | AR1=AR2               |

Quando se analisa as quatro frações granulométricas das areias AR1 e AR2, observa-se que de forma geral elas se comportam de maneira inversa (Tabela 4.6). De forma geral, a areia AR1 apresenta aumentos dos valores de massa unitária, com a diminuição da granulometria, enquanto que a areia AR2, apresenta diminuição dos valores destas características, com a diminuição da granulometria (Figura 4.1 e Tabela 4.6). Em relação as taxas de absorção de água e os valores de massa específica; a areia AR1 apresenta diminuição nas taxas de absorção de água e aumentos dos valores de massa específica com a diminuição da granulometria, já a areia AR2, se comporta de maneira inversa, com diminuição nos valores de massa específica e aumentos nas taxas de absorção de água com a diminuição da granulometria (Figura 4.2, Tabela 4.6).

Uma hipótese para estes comportamentos, podem estar na composição mineralógica e químicas, das frações granulométricas das areias AR1 e AR2, como também no processo de beneficiamento das mesmas. Os resultados apresentados também mostram, que de forma geral, as “frações grossas” das areias recicladas apresentam características físicas diferentes das “frações finas”, o que pode significar novas possibilidades de aplicação de

frações específicas das areias recicladas em argamassas e concretos. Na condição areia composta, as areias recicladas apresentam massa específica aparente e absorção de água similares, contudo a areia AR1 se mostra, de forma geral, mais densa e com granulometria mais contínua que a areia AR2 (Tabela 4.6).

Os resultados dos ensaios de caracterização física revelaram algumas questões importantes a respeito das frações granulométrica areias AR1 e AR2, que serão sintetizadas a seguir:

- Constatou-se que as frações das areias recicladas podem ser separadas em dois grupos, com comportamentos e características com tendências distintas: o grupo das “frações grossas” e o grupo das “frações finas”, o que pode ser entendido como avanço quanto as possibilidades de aplicação destes materiais em misturas cimentícias.
- Verificou-se também, que as areias recicladas tendem a comportamentos inversos com a diminuição da granulométrica, que poderão ser melhor entendidos através das análises mineralógicas e químicas de suas frações.
- Notou-se que se por um lado, as frações das areias recicladas são distintas e seus comportamentos são inversos com a diminuição da granulometria; por outro lado, quando as mesmas são analisadas em sua totalidade, elas se mostram homogêneas, apresentando uma tendência de comportamento inversamente proporcional para as características de massa específica e absorção de água; corroborando com estudos científicos da área.
- Os menores valores de massa específica e massa unitária e as maiores taxas de absorção de água das areias recicladas em relação a areia de referência, apontam para a presença de pasta de cimento nas areias AR1 e AR2.
- Para as características físicas investigadas até aqui, pode se dizer que as “frações grossas” da areia AR2 se mostram superiores as “frações grossas” da areia AR1 e o contrário aconteceria em relação as “frações finas”. Uma hipótese levantada é

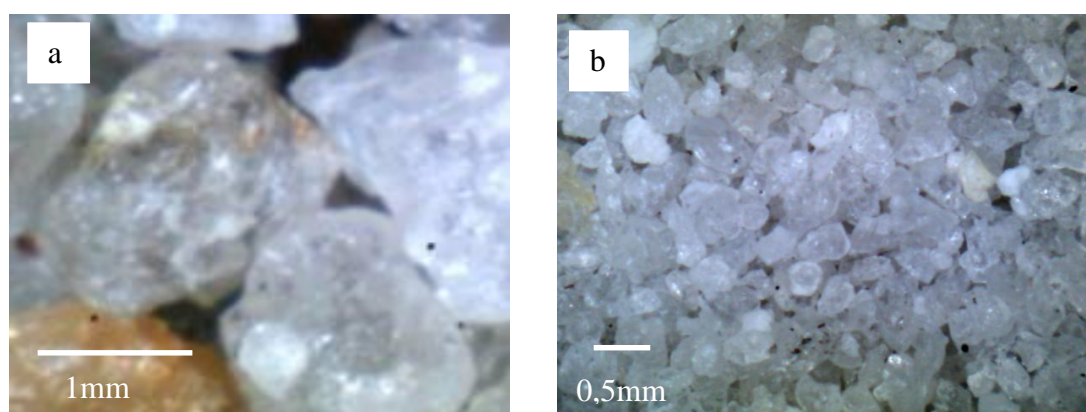
de que estas diferenças se devam a maior presença de pasta de cimento nas “frações grossas” da areia AR1 e nas “frações finas” da areia AR2.

## **B) Características visuais e morfológicas das frações granulométricas das areias**

A seguir serão apresentadas nas Figuras 4.4 a 4.14, imagens das areias: AN, AR1 e AR2, realizadas pela lupa eletrônica (ampliação de 50X) e pelo MEV. Com o intuito de evitar a presença de material pulverulento na superfície dos grãos, as amostras foram submetidas a uma nova lavagem, antes da realização das imagens.

Com relação às análises do MEV, chama-se atenção para as concavidades que aparecerão ao fundo de algumas imagens, estas se referem aos poros da fita adesiva de carbono, utilizada para fixar os grãos de areia no porta amostras. Portanto devem ser desconsideradas durante as discussões. Outra questão, se refere às frações da areia normal do IPT, como elas se mostraram de forma geral, homogêneas, optou-se por apresentar apenas algumas imagens desta areia.

Apresenta-se a seguir, as características visuais e morfológicas da areia AN (Figuras 4.4 e 4.5).

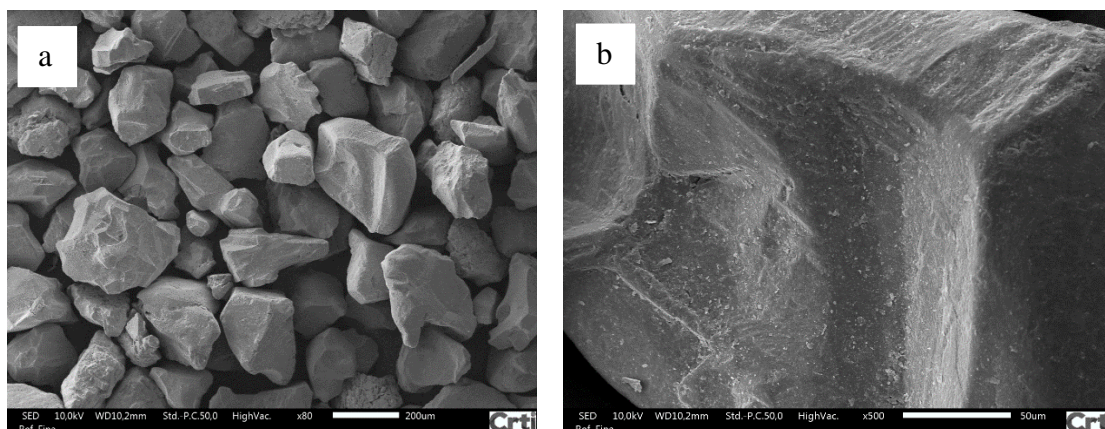


**Figura 4.4 \_ Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica, das frações granulométrica da areia AN: (a) grossa e (b) média fina.**

Observando as imagens da lupa eletrônica da Figura 4.4, como era de se esperar, a areia do IPT apresenta aspectos bem homogêneos, no que se refere a cor, a forma e a textura. Em relação à cor, os cristais de quartzo apresentam coloração de forma geral, branca transparente (Figura 44).

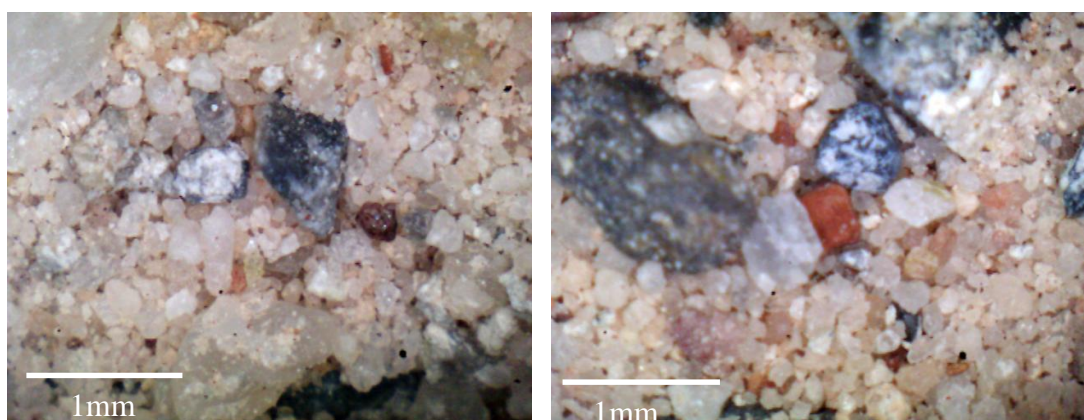


Em relação a forma e a textura, as imagens do MEV da fração fina da areia AN, mostram grãos com forma aparentemente sub arredondada e a textura parece polida (Figura 4.5).



**Figura 4.5 \_ Imagens do MEV de alguns grãos da fração granulométrica fina da areia AN: (a) imagem geral dos grãos, (b) superfície de um grão.**

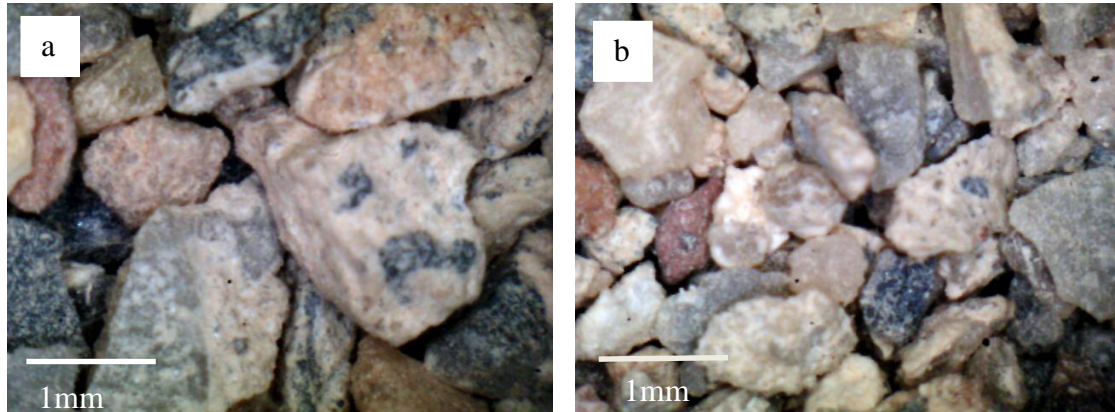
Apresenta-se a seguir, as características visuais e morfológicas da areia AR1 (Figuras 4.6 a 4.10). Na Figura 4.6, apresenta a areia originária da usina de RCD.



**Figura 4.6 \_ Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica na areia primária AR1.**

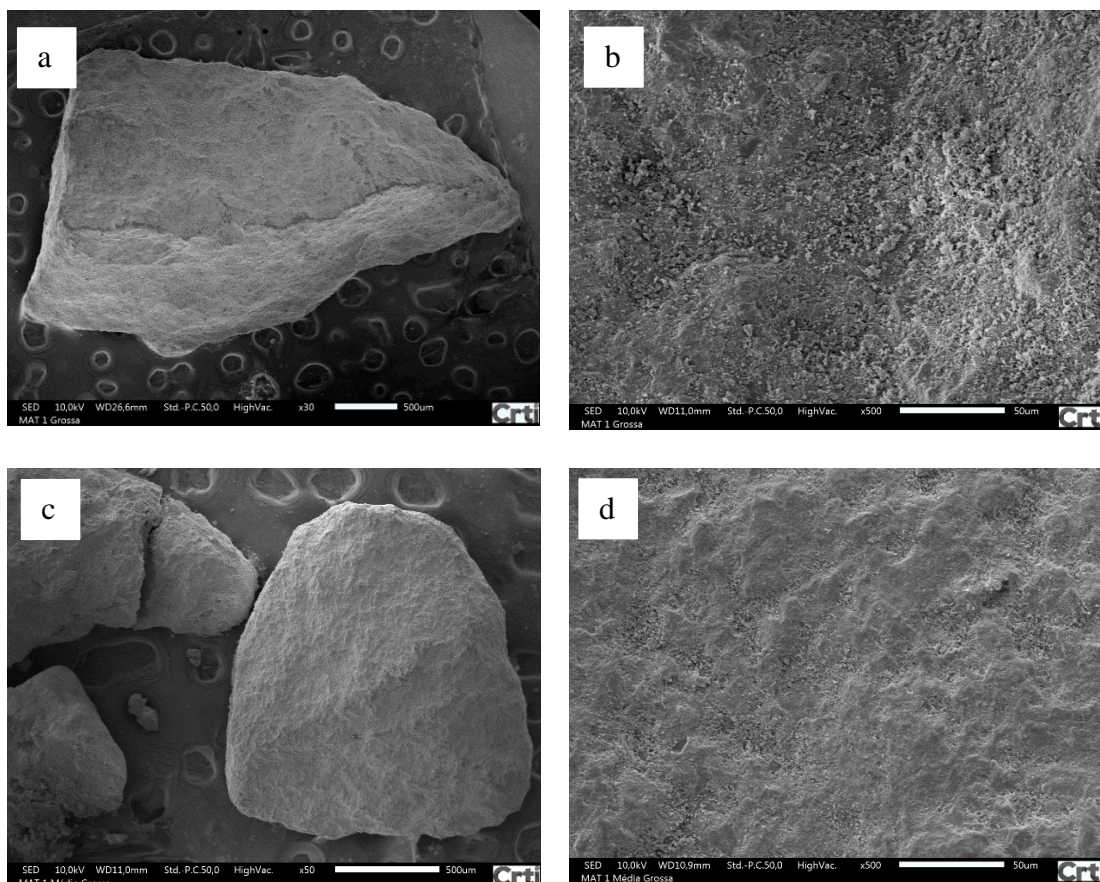
A areia original apresenta diversidade inerente a este tipo de material, com grãos de tamanhos variados, com coloração e formas também distintos. Em relação à cor, apesar dos RCD passarem por uma triagem manual, onde a priori, apenas resíduos de cor cinza seguiriam para o processo de beneficiamento, observa-se uma coloração rosada nesta areia. Acredita-se que a tal coloração, se deva a presença de material argiloso misturado ao concreto (Figura 4.6).

Observa-se na Figura 4.7, que as frações grossa e média grossa da areia AR1, apresentam grãos de forma irregular e a coloração é diversa. Além disso, observa-se uma camada de pasta de cimento endurecida, aderida à superfície dos grãos destas frações.



**Figura 4.7 \_** Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica das frações granulométrica da areia AR1: grossa (a) e média grossa (b).

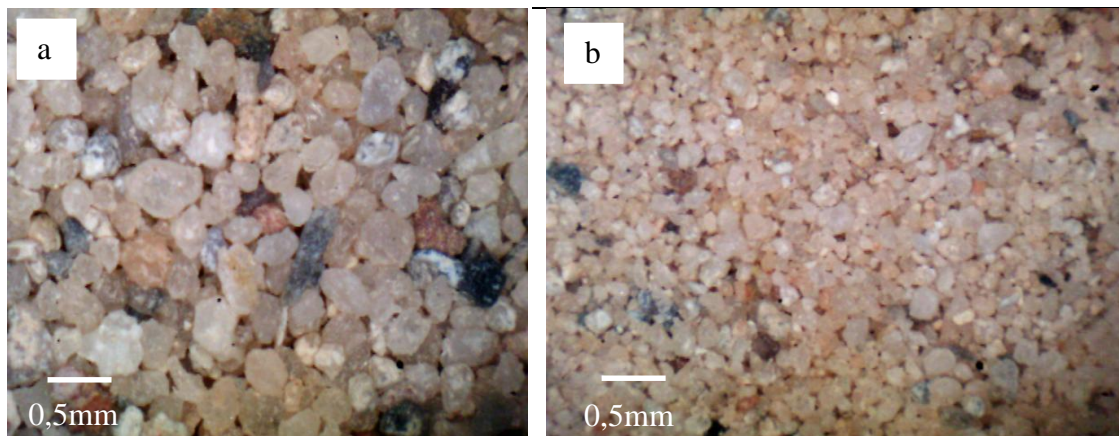
As imagens do MEV da Figura 4.8, apresentam grãos das “frações grossas” da areia AR1.



**Figura 4.8 \_** Imagens do MEV da areia AR1: imagem geral de um grão (a) e superfície do grão (b), da fração grossa; imagem geral de um grão (c) e superfície do grão (d) da fração média grossa.

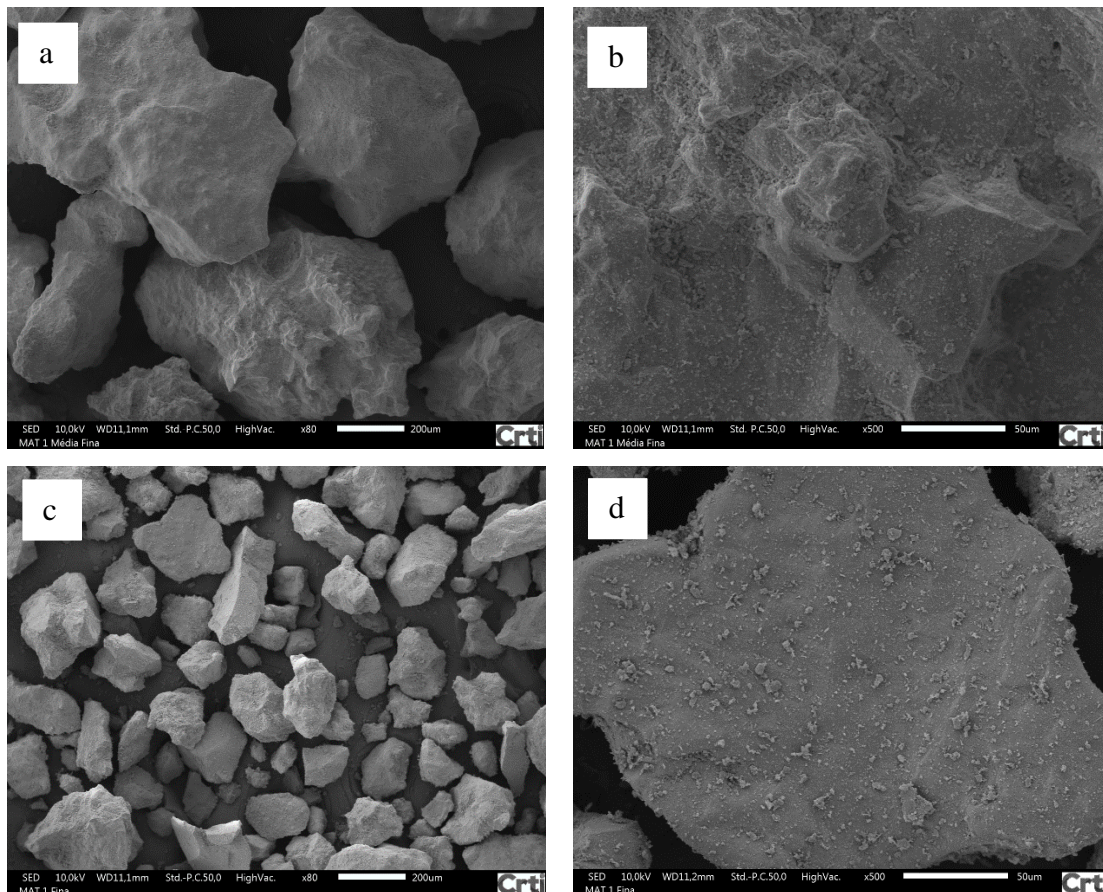
Em relação a forma; nota-se um grão de forma angular na fração grossa (Figura 4.8 a), e um grão de forma sub arredondada na fração média grossa (Figura 4.8 c). Logo, percebe-se que as “frações grossas” da areia AR1, apresentam grãos de formas variadas (Figura 4.8 a, c). Observa-se na Figura 4.8 b, d, que os grãos são aparentemente rugosos e parecem apresentar alta área superficial. Observa-se ainda, que a superfície do grão da fração grossa (Figura 4.8 b), mostra-se com aparência mais porosa, que a superfície do grão da fração média grossa (Figura 4.8 d). Segundo Poon, Shui e Lam (2004) e Santos (2016), tal aspecto é indício de presença de pasta de cimento, aderida a superfície do grão.

Na Figura 4.9, observa-se que as frações granulométricas média fina e fina da areia AR1, se mostram semelhantes; com aumento da fase mineral em relação as “frações grossas”, pois parece haver pouca presença de pasta de cimento aderida aos grãos. As mesmas lembram a areia AN, pois em ambas prevalecem grãos com aspecto de quartzo, porém estes são rosados.



**Figura 4.9 \_** Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica, nas frações granulométrica da areia AR1: média fina (a) e fina (b).

Contudo, as imagens do MEV da fração média fina e fina da areia AR1 (Figura 4.10), revelam-se diferentes da areia de referência, pois mostram grãos com textura aparentemente rugosa e área superficial aparentemente alta. Em relação à forma, os grãos da fração média fina, têm forma aparentemente sub angular e os grãos da fração fina apresentam formas irregulares, além de tamanhos bastante variados.

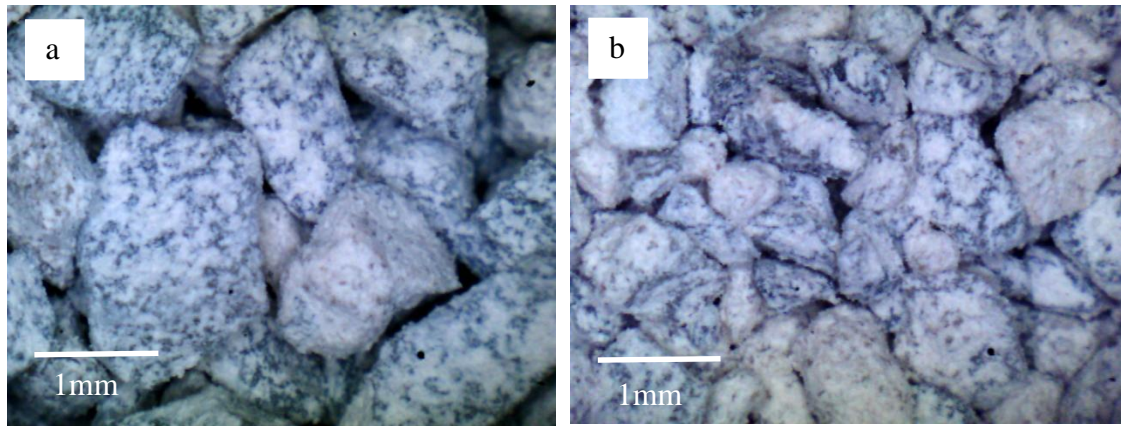


**Figura 4.10 \_ Imagens do MEV da areia AR1: imagem geral de um grão (a) e superfície do grão (b), da fração média fina; imagem geral de um grão (c) e superfície do grão (d) da fração fina.**

As imagens da Figura 4.10 c, d, mostram a presença de pequenos fragmentos aderidos à superfície destes grãos, que podem ser de pasta de cimento. Por outro lado, as superfícies dos grãos, não mostram aparência porosa, como no grão da fração grossa (Figura 4.9 b).

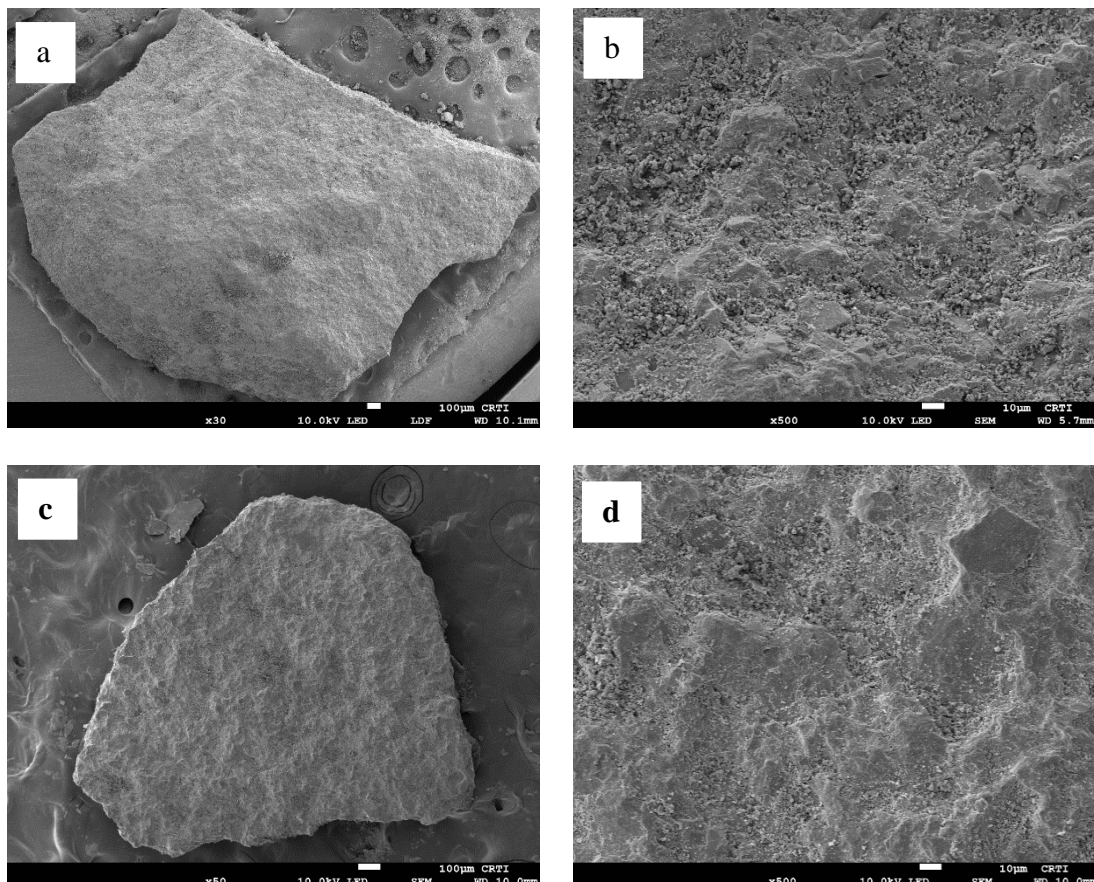
Apresenta-se a seguir, as características visuais e morfológicas da areia AR2 (Figuras 4.11 a 4.14).

Observa-se na Figura 4.11 a seguir, que as “frações grossas” da areia AR2, têm grãos de coloração rosada e acinzentada e apresentam uma camada de cimento aderida a superfície dos grãos.



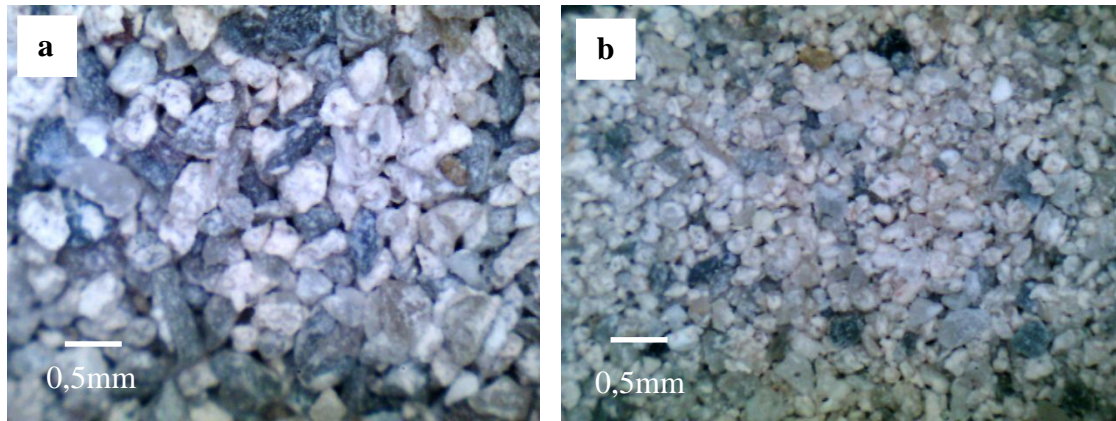
**Figura 4.11** \_ Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica, nas frações granulométrica da areia AR2: grossa (a), média grossa (b), média fina (c) e fina (d).

As imagens do MEV das “frações grossas” da areia AR2, apresentados na Figura 4.12, mostram grãos aparentemente rugosos, com aspecto poroso, e com área superficial aparentemente alta; assim como os grãos da areia AR1 (Figuras 4.8 e 4.10). Em relação as formas, estas são aparentemente variadas, assim como as das “frações grossas” da areia AR1.



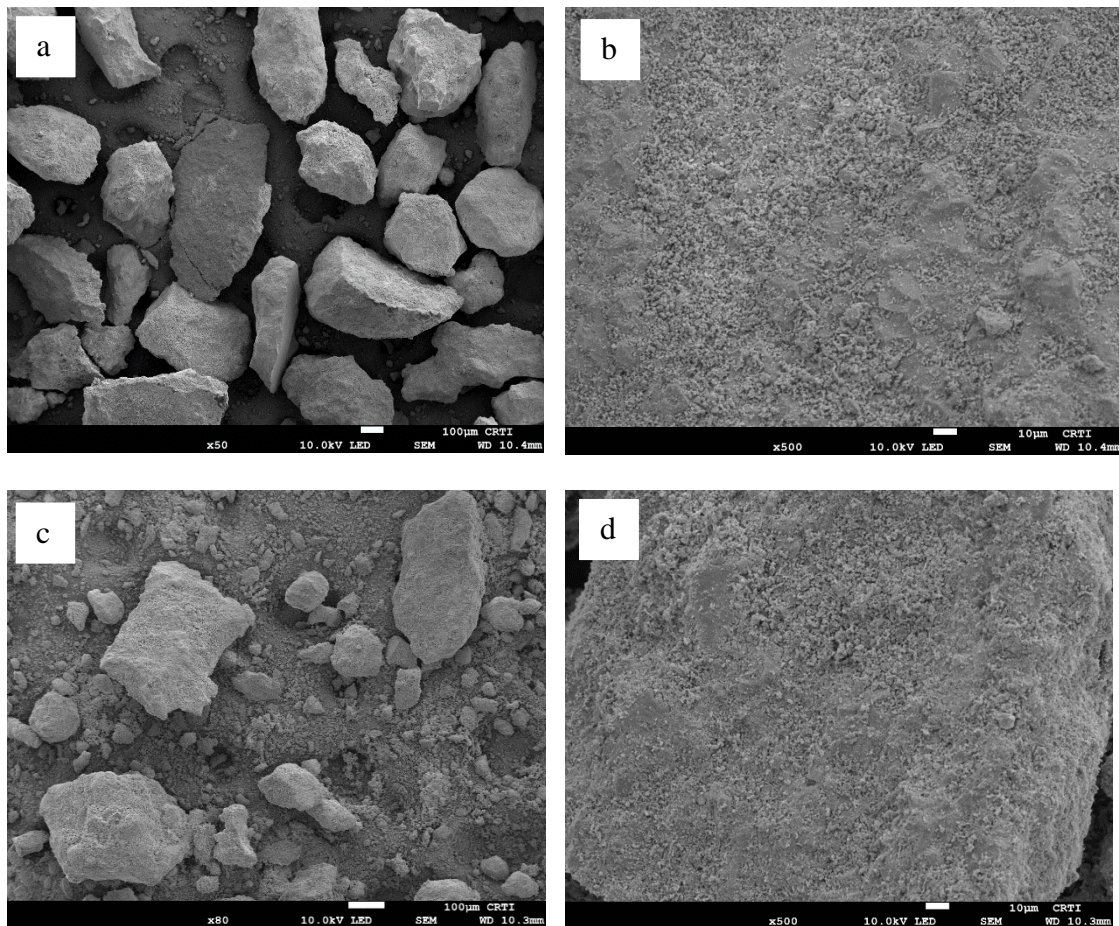
**Figura 4.12** \_ Imagens do MEV da areia AR2: imagem geral de um grão (a) e superfície do grão (b), da fração grossa; imagem geral de um grão (c) e superfície do grão (d) da fração média grossa.

Observa-se na Figura 4.13, que as “frações finas” da areia AR2 têm grãos de coloração rosada e acinzentada, as formas parecem diversas. Contudo, as imagens não permitem afirmar que há aumento da fase mineral (agregado natural) nestas frações, quando comparadas as “frações grossas”.



**Figura 4.13 \_ Imagens ilustrativas realizadas pela lupa eletrônica, nas frações granulométrica da areia AR2: média fina (a) e fina (b).**

A Figura 4.14, apresenta os aspectos morfológicos das “frações finas” da areia AR2. Observa-se que as “frações finas” da areia AR2 apresentam aspecto ainda mais poroso que nas “frações grossas” (Figura 4.14 b, d). Em relação as formas da fração média fina, estas são aparentemente irregulares (Figura 4.14 a, c)



**Figura 4.14 \_ Imagens do MEV da areia AR2: imagem geral de um grão (a) e superfície do grão (b), da fração média fina; imagem geral de um grão (c) e superfície do grão (d) da fração fina.**

Na imagem da fração fina (Figura 4.14 c), nota-se a presença de pequenos fragmentos, mostrando expressiva variação nos tamanhos dos grãos desta fração. Algo semelhante, já havia sido observado no trabalho de Evangelista *et al.* (2015). Os pesquisadores constataram que as frações mais finas das areias recicladas de concreto, apresentavam cerca de 50% de partículas com diâmetro abaixo do tamanho da peneira correspondente. Segundo os pesquisadores, isso se deve aos aglomerados formados pelas partículas finas e pulverulentos, que mascaram o resultado do peneiramento vibratório a seco convencional.

As imagens apresentadas acima mostram, que enquanto a areia normal apresenta aspecto homogêneo, com grãos sub arredondados, textura polida e cor branca transparente; as areias recicladas apresentam superfície rugosa, formas diversas e área superficial aparentemente alta, comuns as areias recicladas. Tais características segundo Levy (2001), seriam responsáveis por maiores consumos de água, influenciando também no volume total de pasta necessária para garantir a plasticidade das misturas. Por outro lado,

segundo Buttler (2003) e Rato (2006), sua maior superfície específica faria melhorar a aderência entre a pasta de cimento hidratada e o agregado reciclado.

As imagens da lupa eletrônica confirmam que as “frações grossas” das areias recicladas são diferentes das “frações finas”, contudo não permitiram confirmar se as “frações grossas” da areia AR1 apresentam maior quantidade de pasta de cimento que as “frações grossas” da areia AR2.

Por outro lado, as imagens da lupa, mostraram indícios do aumento da presença da fase mineral das “frações grossas” para as “frações finas” da areia AR1. Tais resultados corroboram com os resultados dos ensaios físicos; que mostraram diminuição nas taxas de absorção de água e aumentos dos valores de massa específica com a diminuição da granulometria desta areia.

Em relação a areia AR2, as imagens da lupa não permitiram afirmar se houve aumento da fase mineral nas “frações finas”. Contudo, as imagens do MEV mostraram indícios da presença de pasta de cimento na superfície dos grãos de todas as frações granulométricas da areia AR2, inclusive na fração fina, onde observou-se a presença de fragmentos, que podem ser de pasta de cimento. Um apanhado literário realizado por Silva, De Brito e Dhir (2014), revelou que para areias de RC, quanto maior o número de etapas de britagem menor seria sua massa específica, pois a argamassa liberada durante a britagem se acumularia na areia, fazendo parte da sua própria constituição. Acredita-se, que fragmentos de pasta de cimento tenham se acumulado nas “frações finas”, principalmente na fração fina da areia AR2, fazendo com que os valores de massa específica diminuíssem e as taxas de absorção de água aumentassem (Figura 4.14 c).

A literatura (TOPÇU e SENDEL, 2004; DE JUAN, 2005; ULSEN *et al.*, 2010; ULSEN *et al.*, 2013b; KAHN, *et al.*, 2014) mostra que os agregados reciclados miúdos (de RCD ou RC), apresentam maior quantidade de pasta de cimento aderida que os agregados reciclados graúdos. Contudo, este estudo mostra que a presença de pasta de cimento pode variar dependendo da fração granulométrica analisada e de maneira diferente, dependendo da origem da areia reciclada. O que se sabe é que a presença da pasta de cimento aderida ao agregado reciclado vai variar dependendo do processo de beneficiamento (TENÓRIO, 2007; PAVÓN, 2010; ULSEN *et al.*, 2013b;



EVANGELISTA *et al.*, 2015) como: modelo do britador, a abertura de sua mandíbula e o número de vezes que o resíduo será submetido a britagem.

#### 4.1.3 4º Etapa: Análises químicas e mineralógicas das areias

##### A) Análise química por fluorescência de raios X (FRX) e Perda ao fogo

No Apêndice B, encontram-se as tabelas completas, com todos os elementos químicos na forma de óxidos mais estáveis, identificados nas amostras. A Tabela 4.7, apresenta os principais óxidos das areias AN, AR1 e AR2.

**Tabela 4.7: Resultados dos principais óxidos presentes nas frações granulométricas das areias AN, AR1 e AR2.**

| Areias | Óxidos (%)                     | Fração Grossa | Fração M. Grossa | Fração M. Fina | Fração Fina |
|--------|--------------------------------|---------------|------------------|----------------|-------------|
| AN     | SiO <sub>2</sub>               | 94,610        | 96,226           | 94,788         | 86,051      |
|        | CaO                            | 0,106         | 0,118            | 0,135          | -           |
|        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,193         | 4,355            | 3,625          | 8,242       |
|        | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,203         | 0,109            | 0,157          | 0,684       |
|        | SO <sub>3</sub>                | 0,268         | 0,348            | 0,284          | -           |
| AR1    | SiO <sub>2</sub>               | 52,485        | 52,910           | 82,004         | 87,671      |
|        | CaO                            | 29,941        | 29,571           | 9,719          | 5,128       |
|        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6,673         | 6,615            | 4,198          | 4,321       |
|        | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,322         | 4,472            | 1,505          | 1,205       |
|        | MgO                            | 4,257         | 4,344            | 1,560          | 0,781       |
| AR2    | SO <sub>3</sub>                | 0,547         | 0,519            | 0,368          | 0,426       |
|        | SiO <sub>2</sub>               | 26,272        | 27,941           | 33,231         | 38,458      |
|        | CaO                            | 58,652        | 57,235           | 52,945         | 48,513      |
|        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,904         | 5,586            | 5,283          | 5,028       |
|        | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,307         | 3,354            | 3,084          | 2,839       |
|        | MgO                            | 1,846         | 1,772            | 1,669          | 1,500       |
|        | SO <sub>3</sub>                | 0,571         | 0,657            | 1,055          | 1,480       |

Analisando a Tabela 4.7, vê-se que a sílica (SiO<sub>2</sub>) é o principal óxido constituinte da areia de referência AN e da areia reciclada AR1. Os teores ficam acima de 90% na areia AN e na areia AR1, os teores variam em média de 52% nas “frações grossas”, chegando a 85% nas “frações finas”. Já na areia AR2, a sílica está presente em apenas 27% das “frações grossas”, chegando ao percentual máximo de 35,5% nas “frações finas”. Segundo Ulsen *et al.* (2010), nas areias recicladas, a sílica está associada, principalmente, aos agregados naturais, de origem siliciosa, presentes nos resíduos.

Segundo Ulsen *et al.* (2010), o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de magnésio (MgO) se referem à pasta de cimento endurecida. No caso deste estudo, estes elementos podem

também se referir as rochas de origem calcária. Juntos o CaO e MgO, representam o segundo elemento mais presente na areia AR1, os valores ficam em torno de 33,6% nas “frações grossas”, e em torno de 8,6% nas “frações finas”, uma queda de 74,5% (Tabela 4.7). Na areia AR2 este elemento está presente em média 59,8% das “frações grossas” e 52,3% nas “frações finas”, o que representa uma queda de 12,5% entre as frações grossas e as finas (Tabela 4.7).

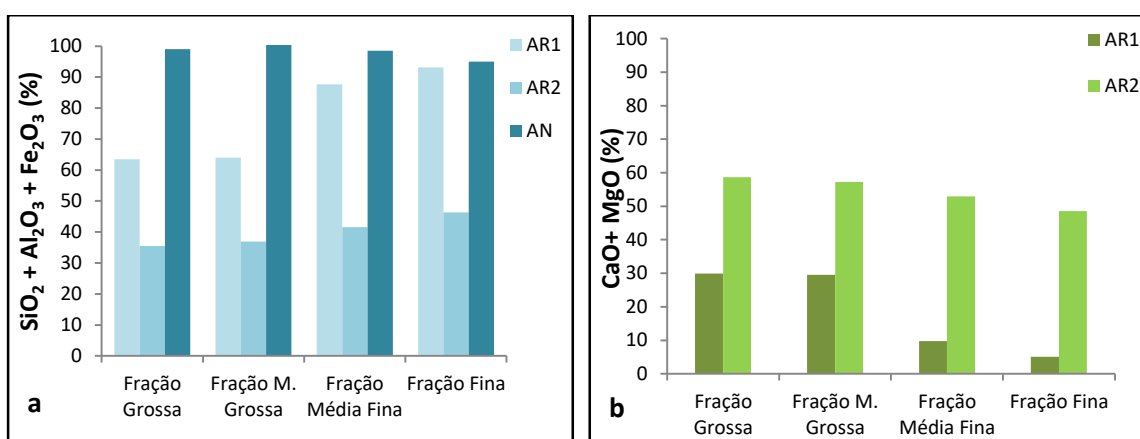
Os altos teores de CaO e MgO da areia AR2, em relação à areia AR1, podem ser justificados em função da origem dos RC que geraram esta areia, corpos de prova de concreto, compostos de argamassa e agregados, sendo parte destes de origem calcária. Em relação a areia AR1, seus altos teores de sílica são indicativos de que as rochas que prevaleceram nos RCD utilizados para beneficiar esta areia tinham origem siliciosa (quartzos ou feldspatos).

Como colocado anteriormente, não só o material de origem, mas também o processo de beneficiamento \_ em especial a etapa de britagem \_ influenciam na composição final das areias recicladas. Foi o que constataram diversos autores como De Juan e Gutiérrez (2009); Ulsen *et al.* (2010); Pavón Martínez e Etxeberria.(2014); Gomes *et al.* (2015). Porém, como o processo de beneficiamento não foi objeto deste estudo, não há como mensurar sua influência na constituição das areias AR1 e AR2.

Em relação à presença de sulfato ( $\text{SO}_3$ ), observa-se uma queda percentual de cerca de 24% das “frações grossas” para as “frações finas” da areia AR1. Ao contrário, observa-se uma elevação do percentual de sulfato na areia AR2 de cerca de 50% das “frações grossas” para as “frações finas” (Tabela 4.7). Durante a 2º Etapa, amostras da fração grossa das areias recicladas foram submetidas a análises por cromatografia iônica e os resultados mostraram que as areias recicladas AR1 e AR2 apresentavam taxas de sulfato de 1,8% e 2,4%, respectivamente (Tabelas 4.1 e 4.2). Já a técnica de FRX detectou a presença de 0,55% e 0,57% na fração grossa da areia AR1 e AR2, respectivamente (Tabela 4.7). Apesar de se tratarem de técnicas distintas, ambas detectam óxidos em sua forma total, sendo assim, uma hipótese para resultados tão distintos pode estar na heterogeneidade do material.

Na literatura (ULSEN *et al.*, 2010; ULSEN *et al.*, 2013b; EVANGELISTA *et al.*, 2015) a soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro são associadas aos silicatos presentes nas rochas, areias e cerâmicas, ao passo que a presença de CaO, e MgO, com visto, se referem a pasta de cimento endurecida, ao gesso e as rochas de origem calcária ou carbonáticas.

A Figura 4.15 apresenta as porcentagens de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  e de  $\text{CaO} + \text{MgO}$  das areias AR1 e AR2.



**Figura 4.15 \_ Teores em porcentagem da soma de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  das três areias (a) e Teores em porcentagem de  $\text{CaO} + \text{MgO}$  das areias AR1 e AR2 (b).**

Na Figura 4.15 a, observa-se que as areias se comportam de maneira semelhante ao que foi colocado nos parágrafos anteriores. As frações da areia AR1 apresentam teores de sílica, alumina e óxido de ferro superiores aos da areia AR2, com tendências crescentes das “frações grossas” (63,5%, 36,0%) para as “frações finas” (90%, 44%); para as AR1 e AR2, respectivamente.

Em relação aos teores de  $\text{CaO} + \text{MgO}$  (Figura 4.15 b), observa-se decréscimos para todas as frações granulométricas das areias recicladas, sendo que, na areia AR1 os decréscimos são mais acentuados que na areia AR2. Sendo eles de (29,6%, 58%) nas “frações grossas” e (7,3%, 50,7%) nas “frações finas” para as areias AR1 e AR2, respectivamente

Em relação à perda ao fogo, esta está relacionada: à liberação da água de constituição e gás carbônico dos silicatos de cálcio hidratado; à cal hidratada e carbonatos, à liberação de água dos filossilicatos provenientes dos solos, às cerâmicas e aos outros minerais menores, derivados de rochas graníticas (ULSEN *et al.*, 2010). A Tabela 4.8 a seguir,

apresenta os resultados de perda ao fogo das frações granulométricas das areias AN, AR1 e AR2.

**Tabela 4.8: Resultados de perda ao fogo nas frações granulométricas das areias AN, AR1 e AR2.**

| Areias | Fração Grossa | Fração M Grossa | Fração M. Fina | Fração Fina |
|--------|---------------|-----------------|----------------|-------------|
| AN     | 0,45          | 0,27            | 0,39           | 0,46        |
| AR1    | 18,90         | 18,85           | 3,44           | 3,87        |
| AR2    | 26,75         | 26,24           | 22,47          | 19,14       |

Observa-se na Tabela 4.8, que as frações da areia de referência apresentam baixos teores de perda ao fogo, o que é compreensível uma vez que a sílica está presente em cerca de 90% desta areia (Tabela 4.7). Já nas areias recicladas, observam-se elevadas taxas de perda ao fogo (Tabela 4.8), tal fato se justifica, uma vez que em sua composição química estão presentes além da sílica, os óxidos de cálcio e magnésio, indicando presença de pasta de cimento endurecida, gesso e de rochas de origem calcária.

Nota-se na areia AR1, que as maiores taxas de perda ao fogo estão nas “frações grossas”, devido em parte, a maior presença de pasta aderida à superfície dos grãos destas frações (Tabela 4.8). Nas “frações finas”, observa-se uma queda de 80% das taxas de perda ao fogo, o que também é compreensível, uma vez que foi constatada aumentos expressivos nos teores de sílica nas “frações finas” da areia AR1 (Tabela 4.7).

Em relação a areia AR2 (Tabela 4.8), as maiores taxas de perda ao fogo também estão nas “frações grossas”, devido a pasta de cimento aderida, mas também devido a presença de rocha calcária. Nas “frações finas”, observa-se uma queda nos teores de perda ao fogo (21%), o que é compreensível, uma vez que também foi constatado aumento nos teores de sílica nas “frações finas” da areia AR2 (Tabela 4.7).

Os resultados das análises químicas referentes à presença de sílica e óxido de cálcio e a análise de perda ao fogo, serão comparados aos dados das pesquisas de Solyman (2005); Ulsen *et al.* (2010); Evangelista *et al.* (2015). Solyman (2005), preparou diversas composições de areias, partir de areias recicladas coletadas em duas usinas de reciclagem, destas, escolheu-se duas, que mais se assemelhavam com a areia AR1, para comparação. O pesquisador também trabalhou com uma areia fabricada a partir de corpos de prova de concreto britados em laboratório, que será comparada à areia AR2. Ulsen *et al.* (2010),

trabalharam com três areias recicladas de usinas, que serão comparadas à areia AR1, enquanto que Evangelista *et al.* (2015), trabalharam com areias de corpos de prova de concreto britados em laboratório, que também serão comparadas à areia AR2.

Os trabalhos destes pesquisadores trazem dados gerais sobre areias recicladas, logo não se observa uma tendência de comportamento em função das frações granulométricas. Por este motivo, optou-se por comparar as médias das porcentagens das frações granulométricas das areias AR1 e AR2.

Em relação a presença de sílica, a areia AR1 apresenta em média 69% de sílica (Tabela 4.7), valor próximo aos encontrados por Solyman (2005) (64% e 66,4%) e Ulsen *et al.* (2010) (71,2%, 67,2% e 74%). Por outro lado, a areia AR1 apresenta em média 18% de óxido de cálcio (Tabela 4.7), valor superior aos encontrados por Ulsen *et al.* (2010) (8,5%, 8,4% e 0,9%) e por Solyman (2005) (6,8% e 8,8%). Acredita-se que as diferenças dos teores de CaO, podem ser justificadas em função da origem dos RCD que geraram a areia AR1 e os que geraram as areias de Ulsen *et al.* (2010) e Solyman (2005). Parte dos agregados utilizados nas obras do Distrito Federal são de rochas de origem calcária, por outro lado, as areias recicladas da pesquisa de Ulsen *et al.* (2010), vem de usinas que não estão localizadas em regiões de rocha calcária. O que justificaria a presença de um maior percentual de CaO na areia AR1, em relação as areias recicladas de Ulsen *et al.* (2010). Quanto ao trabalho de Solyman (2005), o pesquisador não especificou qual seria a origem dos agregados naturais presentes na região de sua pesquisa.

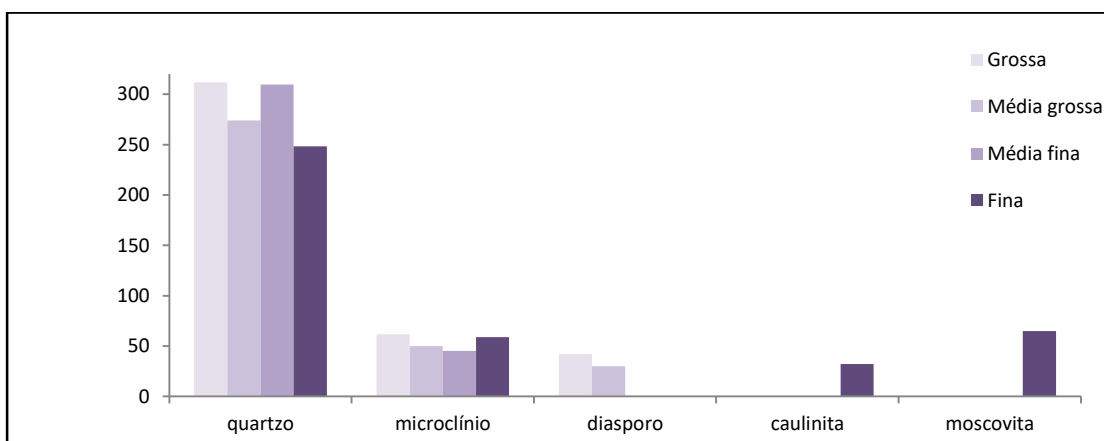
A areia AR2 apresenta teor médio de sílica de 31,5% (Tabela 4.7), inferior aos teores encontrados por Solyman (2005) (75,4%) e por Evangelista *et al.* (2015) (60,1% e 81,1%). Em relação ao óxido de cálcio, a areia AR2 apresenta teor médio de 54% (Tabela 4.7), bem superior aos teores encontrados por Solyman (2005) (12,4%) e por Evangelista *et al.* (2015) (4,3% e 12,4%). As diferenças de composição química observados entre a areia AR2 e as areias das pesquisas acima, podem ser justificadas em função da origem dos RC que geraram a areia AR2, corpos de prova de concreto (argamassa e agregados parte de origem calcária).

As comparações apresentadas acima, mostraram que as diferenças de composição observadas entre as areias recicladas deste estudo, e as areias de Solyman (2005), Ulsen

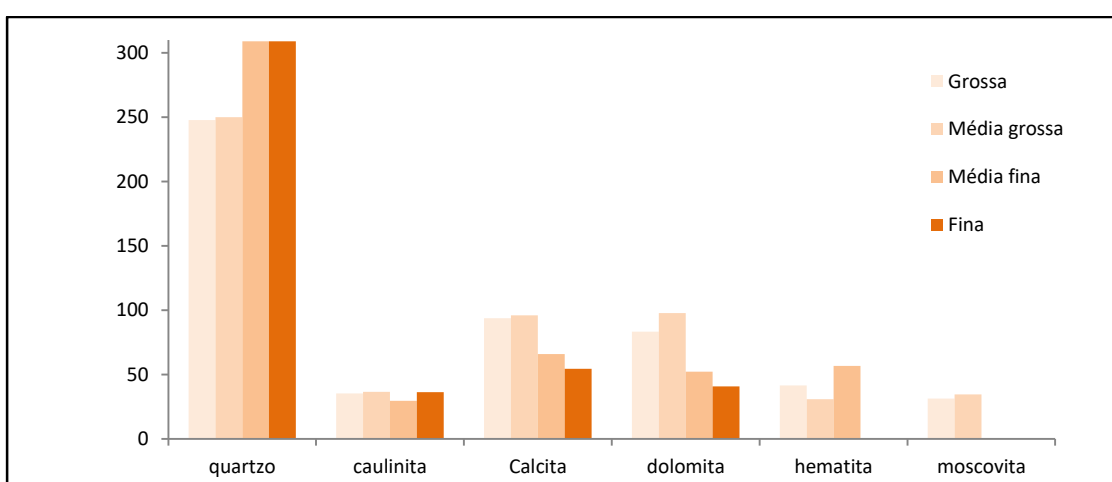
*et al.* (2010) e Evangelista *et al* (2015) se devem a heterogeneidade intrínseca à natureza dos agregados reciclados, influenciadas principalmente pelas características dos materiais de origem e pelo processo de beneficiamento.

## B) Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)

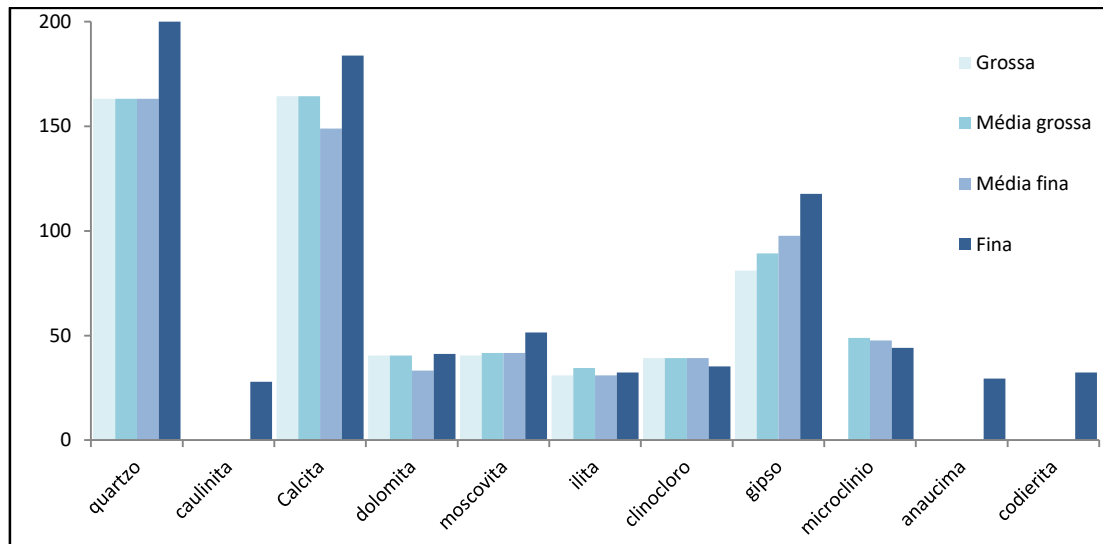
A seguir desenvolve-se discussão sobre as principais fases cristalinas presentes frações granulométricas das areias AN, AR1 e AR2. (Figuras: 4.16, 4.17 e 4.18). A intensidade do pico principal de cada mineral são representados em gráficos de colunas, numa análise qualitativa, baseada em Evangelista *et al.* (2015). Os difratogramas das frações granulométricas das areias se encontram no Apêndice B deste documento.



**Figura 4.16 \_ Análise qualitativa das principais fases cristalinas da areia AN (fases cristalinas *versos* intensidade dos picos).**



**Figura 4.17 \_ Análise qualitativa das principais fases cristalinas da areia AR1 (fases cristalinas *versos* intensidade dos picos).**



**Figura 4.18 \_ Análise qualitativa das principais fases cristalinas da areia AR2 (fases cristalinas *versos* intensidade dos picos).**

Observa-se nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, que a fase cristalina com maior intensidade de pico nas três areias é o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Na areia AR1, a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), aparecem como segunda fase cristalina com maior intensidade de pico (Figura 4.17). Já na areia AR2, a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) aparece também como fase cristalina com maior intensidade de pico, juntamente com o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) (Figura 4.18). O gipso ( $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) aparece como terceira fase cristalina com maior intensidade de pico na areia AR2 (Figura 4.18).

Segundo Evangelista *et al.* (2015), a presença da fase cristalina quartzo se deve ao agregado original, uma vez que este é o mineral mais abundante nas rochas. Nas areias recicladas, segundo Evangelista *et al.* (2015), a presença das fases cristalinas calcita, dolomita e gipso podem estar associadas aos produtos de hidratação do cimento presentes na pasta de cimento. Nas frações finas, eles também podem estar associados à carbonatação, principalmente da calcita. No caso deste estudo, a presença das fases cristalinas calcita e dolomita também podem estar associados ao calcário, presente na própria rocha original das areias AR1 e AR2.

A Figura 4.17, mostra que nas frações granulométricas: média fina e fina da areia AR1, há diminuição das fases cristalinas calcita e dolomita e crescimento da fase cristalina quartzo, com aumentos mais expressivos para fração fina. O aumento da fase mineral quartzo se deve em parte, à própria natureza dos resíduos que deram origem a esta areia, como também à perda de pasta de cimento durante as etapas de britagem, fazendo com

que houvesse o aumento da fase mineral na areia AR1. Sendo assim, os aumentos da fase mineral quartzo com a diminuição das frações granulométricas desta areia, corroboram com os resultados de FRX (Tabela 4.7), que mostraram aumentos dos teores de sílica, com a diminuição da granulometria das areias recicladas.

Na areia AR2 (Figura 4.18), observam-se picos elevados de calcita em todas as frações granulométricas, o que pode ser explicado pela presença dos compostos do concreto original (argamassa e agregados, parte de origem calcária). A presença da fase cristalina gipso, se deve ao material que não reagiu com o aluminato durante a hidratação do cimento (composto de cimento anidro). Observa-se que a fração fina da areia AR2, quando comparada às demais frações desta areia (Figura 4.18), apresenta picos mais expressivos para as principais fases cristalinas: quartzo, calcita e gipso. Atribui-se o aumento destas fases cristalinas à pasta aderida aos grãos e ao mineral original, que não resistindo a energia das britagens, se acumularam também na fração fina da areia, fazendo parte da própria constituição desta fração, como também à carbonatação destas fases. O aumento da presença de quartzo na fração fina, corrobora com os resultados de FRX (Tabela 4.7) que mostram aumento dos teores de sílica também na areia AR2.

De Juan e Gutiérrez (2009) mostraram em seus estudos, que a quantidade de pasta de cimento (representada pela presença do mineral gipso) é diretamente proporcional ao teor de sulfato. Portanto, acredita-se, que a elevação dos picos de gipso da areia AR2, (Figura 4.18), sejam os responsáveis pela elevação dos teores de sulfatos, observados na análise de FRX da areia AR2 (Tabela 4.7). Contudo, como colocado anteriormente (item 4.1.1), o gipso faz parte da composição do cimento (pode conter até 5% de gesso), logo parte do gipso detectado pode se referir também à composição do próprio cimento original.

As análises de DRX mostraram que as areias recicladas são distintas, contudo tanto na areia AR1, quanto na areia AR2, constatou-se aumento da fase mineral com a diminuição da granulometria das areias recicladas. Os resultados do DRX para areia AR1, corroboram com os resultados de FRX e com as imagens da lupa eletrônica que mostraram aumento da fase mineral nas frações finas desta areia. Contudo, através das imagens da lupa eletrônica das frações finas da AR2, não foi possível constatar aumento da fase mineral, que só foi confirmada, através das análises de DRX e FRX. Os DRX também mostraram aumento da pasta de cimento nas “frações finas” da areia AR2,



através dos aumentos gradativos da fase cristalina gipso (composto de cimento anidro), com a finura do material.

As análises de DRX também mostraram que as areias recicladas são diversas, quando se compara o número de fases cristalinas presentes na areia de referência (Figura 4.16), com o número de fases cristalinas presentes nas areias AR1 e AR2 (Figuras 4.17 e 4.18). Apesar da diversidade, observa-se de forma geral, os mesmos minerais estão presentes em todas as frações granulométricas das areias recicladas, mostrando assim que as mesmas apresentam homogeneidade de constituição, assim como apresentaram homogeneidade de comportamento com relação as características de massa específica e absorção de água (Figura 4.3).

Confirmado o aumento da fase mineral quartzo, com a diminuição da granulometria das areias recicladas, e o aumento da presença de pasta de cimento nas “frações finas” da areia AR2, é possível entender alguns comportamentos e fazer algumas constatações:

- Na areia AR1, observa-se que com a diminuição da granulometria, há elevação dos teores de sílica, que refletem na diminuição das taxas de absorção de água. Em contrapartida, observa-se aumento dos valores massa específica nas “frações finas”.
- As imagens da lupa eletrônica das Figuras 4.4 e 4.9, mostraram semelhanças visuais entre as “frações finas” da areia AR1 e as “frações finas” da areia de referência (AN), tais semelhanças se confirmam através das análises químicas (Figura 4.15 a), que mostraram que a areia AR1 apresenta 11% a menos de sílica, alumina e óxido de ferro na fração média fina, chegando a apresentar apenas 2% a menos destes elementos na fração fina. Este resultado pode ser entendido como algo positivo, uma vez que a maior presença destes elementos na areia reciclada AR1 poderia significar indiretamente, menores valores de pasta de cimento nestas frações. Por outro lado, a areia AR1 se diferencia da areia de referência AN, ao apresentar, mesmo que em baixas proporções, teores de  $\text{CaO} + \text{MgO}$ , nas “frações finas”. Tais elementos podem estar associados à rocha calcária, mas também podem estar associados à pasta de cimento, como também à carbonatação.

- Na areia AR2, observa-se a diminuição dos valores de massa específica e o aumento nas taxas de absorção de água, com a diminuição da granulometria. Tal comportamento poderia ser entendido da seguinte forma; ainda que a areia AR2 apresente um discreto aumento nos teores de sílica, alumina e óxido de ferro, com a diminuição da granulometria, observa-se, o aumento gradativo fase cristalina gipso, que está associada principalmente a presença da pasta de cimento (Figura 4. 18). A elevação da fase cristalina gipso e a presença considerável de óxido de cálcio e magnésio (considerando que parte destes óxidos se referam a compostos hidratados e não hidratados da pasta de cimento endurecida) nas “frações finas”, justificariam a diminuição dos valores de massa específica e a elevação nas taxas de absorção de água da areia AR2 (Figura 4.2).

Em relação à hipótese colocada anteriormente, de que as menores taxas de absorção de água das areias AR1 e AR2, em relação às de outros trabalhos (Figura 4.5), se deviam a maior presença da fase mineral, não puderam ser confirmadas através das análises mineralógicas e químicas. Uma vez que a presença das fases cristalinas calcita e dolomita e dos óxidos CaO e MgO podem estar associados tanto a presença de pasta de cimento, quanto a presença de rocha calcária.

Apesar de não ser possível mensurar quanto da proporção CaO e MgO se refere a pasta de cimento, foi possível constatar, de forma indireta, que a pasta de cimento está presente nas frações da areia AR1 de diferentes maneiras. Os maiores teores de sílica nas “frações finas”, são indicativos de menor presença de pasta de cimento nestas frações, o que não é possível afirmar para as “frações grossas”, uma vez que estas frações apresentam considerável proporção CaO e MgO. Na areia AR2, os teores de CaO e MgO, juntos estão presentes em média de 50% das “frações grossas” e também das “frações finas”, contudo a presença crescente da fase gipso são indicativos do aumento da presença de pasta de cimento nas “frações finas” da areia AR2. Sendo assim, é possível afirmar que as areias AR1 e AR2 se comportam, como as areias estudadas por De Juan e Gutiérrez (2009); Agrela *et al.* (2011); Ulsen *et al.* (2014), confirmando a relação de que quanto maior a quantidade de pasta de cimento presente, menor seria a massa específica da areia e maior seria sua capacidade de absorver água.

A literatura (TOPÇU e SENDEL, 2004; DE JUAN, 2005; ULSEN *et al.*, 2010; ULSEN *et al.*, 2013b; KAHN, *et al.*, 2014) mostra que os agregados reciclados miúdos (de RCD ou RC), apresentam maior quantidade de pasta de cimento aderida que os agregados reciclados graúdos. Contudo, este estudo mostra que a presença de pasta de cimento pode variar dependendo da fração granulométrica analisada e de maneira diferente, dependendo da origem da areia reciclada.

#### **4.1.4 Considerações sobre a Parte 1 do trabalho**

Apesar das areias recicladas AR1 e AR2 não se classificarem como ARC ou ARM, a importância da etapa de lavagem foi demonstrada, através da diminuição dos teores de finos em todas as frações das areias recicladas; fazendo com que a areia AR2 cumprisse os requisitos de finura regulamentados pela ABNT NRB 15116:2004.

O estudo mostrou que o ensaio de bancada, proposto pela ABNT NRB 15116:2004, e realizado em conformidade com a ABNT NBR 9917:2009, pode não ser o mais adequado para detectar a presença de cloretos e sulfatos. Sendo assim, propõe-se que a norma ABNT NRB 15116:2004, oriente para que a detecção destes íons seja realizada através de técnicas modernas, como a cromatografia iônica, rápida, confiável e economicamente acessível.

Os resultados de caracterização física mostraram que as areias recicladas apresentam menores valores de massa específica e massa unitária, e maiores taxas de absorção de água que a areia de referência, apontando para a presença de pasta de cimento nas areias AR1 e AR2.

Os resultados de caracterização física na condição areia composta, mostraram que a areia AR1 se mostra mais densa e com granulometria mais contínua que a areia AR2.

O estudo das frações granulométricas das areias recicladas revelou uma tendência de comportamento diferente, entre o grupo das “frações grossas” do grupo das “frações finas”, que varia em função da presença de pasta de cimento, dependendo da origem da areia reciclada. Tal fato pode ser considerado como um avanço quanto as possibilidades

de novos *designs* de misturas, aplicando frações específicas de areias recicladas em argamassas e concretos.

Para as características físicas investigadas, pode se dizer que de forma geral, as “frações grossas” da areia AR2 se mostram relativamente superiores as “frações grossas” da areia AR1 e o contrário aconteceria em relação as “frações finas”. Pois se por um lado, as “frações grossas” da areia AR1 absorvem mais água e apresentam menores valores de massa específica que a “frações grossas” da areia AR2. Por outro, as “frações finas” da areia AR1 apresentam maiores valores de massa unitária e menores taxas de absorção de água desta areia em relação a areia AR2.

Observou-se que se por um lado, as frações das areias recicladas são distintas e seus comportamentos são inversos com a diminuição da granulometria; por outro lado, quando as mesmas são analisadas em sua totalidade, elas se mostram homogêneas, em relação ao comportamento das características de massa específica e absorção de água e em relação as suas constituições mineralógicas e químicas.

As análises químicas mostraram que as “frações finas” da areia AR1 e da areia AN, apresentam percentuais de sílica, alumina e óxido de ferro semelhantes. O que pode ser entendido como algo positivo, uma vez que a presença destes elementos na areia AR1, são indicativos de menor presença de pasta de cimento, podendo assim vir a significar melhores desempenhos mecânicos de argamassas confeccionadas com as “frações finas” da areia AR1.

Apesar da composição química da areia AR2, mostrar aumento nos teores de sílica nas “frações finas”, a presença de pasta de cimento, pôde ser confirmada através da presença crescente do mineral gipso com a finura da areia AR2.

## **4.2 PARTE 2: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DAS ARGAMASSAS RECICLADAS**

Após a caracterização das frações granulométricas das areias AR1 e AR2, a Parte 2 da pesquisa investiga suas influências no comportamento físico-mecânico de “argamassas recicladas”. Para fins de comparação, também foram monitoradas “argamassas padrão”, confeccionadas com 100% de areia normal do IPT. As argamassas seguiram os padrões dos testes de cimento, com relação água/cimento de 0,48, massa de 1860g de areia, sendo 465g para cada uma das quatro frações granulométricas, massa do cimento de 624g e massa de água 300g.

Ao fixar a relação água/cimento em 0,48, era natural que houvesse perda de trabalhabilidade nas misturas que continham areias recicladas, quando comparadas às misturas que continham apenas areia normal do IPT. Com o objetivo manter a mesma trabalhabilidade e o mesmo volume a ser produzido das argamassas padrão; foram realizadas compensações na massa de água e na massa das areias recicladas (ver Tabela 3.7 no item 3.2).

Além da compensação na massa de água, foi necessário o uso de uma quantidade de aditivo superplastificante, para que as misturas com areia reciclada alcançassem a faixa de consistência das misturas apenas com areia normal do IPT ( $125 \pm 10$  mm) (ver Tabela 3.8 no item 3.2).

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias e de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias. Os resultados dos ensaios físicos de: absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios, serão discutidos na sequência, no subitem 4.2.2.

### **4.2.1 Análises das propriedades mecânicas das argamassas recicladas**

A fim de testar a homogeneidade da variância e a igualdade de médias dos resultados de resistências à compressão e à tração aos 28 dias, foram aplicados os testes estatísticos: Teste t e Teste de Levene. Os detalhes das análises estatísticas, assim como o resumo dos resultados, se encontram nas Tabelas C1 e C2, no Apêndice C deste documento.

A Tabela 4.9 apresenta os desvios padrão dos ensaios de resistências à compressão e à tração das argamassas. Observa-se que para a resistência à compressão aos 28 dias, dez, das treze argamassas apresentaram desvios padrão dentro do limite de 6%, estipulados pela ABNT NBR 7215:1997. Em relação aos ensaios à tração, apesar da ABNT NBR 7222: 2011, não estipular limites para desvios padrão, observa-se que apenas dois valores de resistência à tração ficaram acima de 6% (Tabela 4.9).

**Tabela 4.9: Desvios padrão dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, das argamassas padrão e recicladas.**

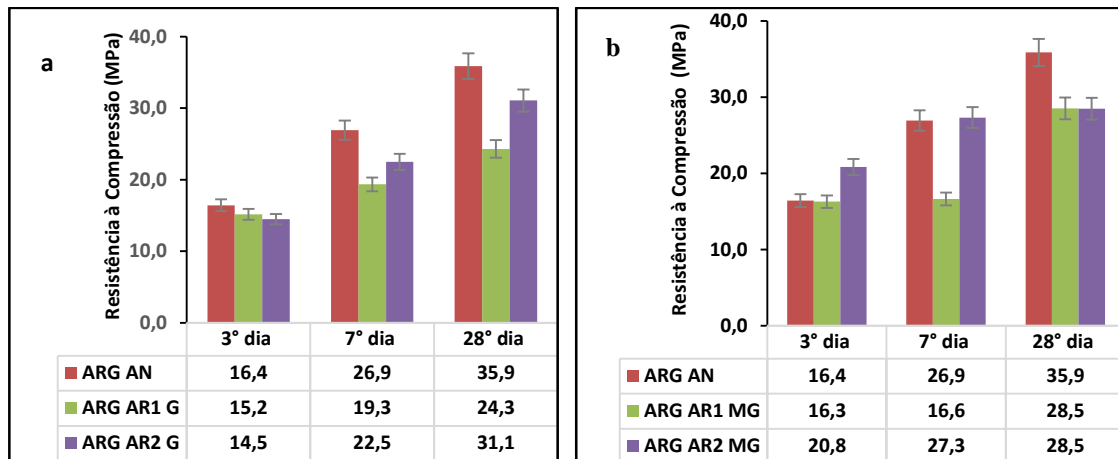
| Argamassas           | Desvio Padrão |        |         |         | Argamassas              | Desvio Padrão |        |         |         |
|----------------------|---------------|--------|---------|---------|-------------------------|---------------|--------|---------|---------|
|                      | Compressão    |        |         | Tração  |                         | Compressão    |        |         | Tração  |
|                      | 3° dia        | 7° dia | 28° dia | 28° dia |                         | 3° dia        | 7° dia | 28° dia | 28° dia |
| ARG <sub>AN</sub>    | 3,90          | 3,29   | 0,93    | 4,33    | ARG <sub>AR2MF</sub>    | 4,00          | 5,24   | 5,05    | 5,46    |
|                      |               |        |         |         | ARG <sub>AR1F</sub>     | 5,13          | 6,48   | 4,98    | 4,23    |
| ARG <sub>ARIG</sub>  | 5,11          | 5,00   | 4,87    | 4,27    | ARG <sub>AR2F</sub>     | 3,82          | 6,80   | 5,70    | 3,92    |
| ARG <sub>AR2G</sub>  | 4,07          | 4,22   | 4,55    | 4,47    | ARG <sub>AR1AC25%</sub> | 2,93          | 4,53   | 6,50    | 5,78    |
| ARG <sub>ARIMG</sub> | 6,21          | 5,88   | 4,77    | 6,56    | ARG <sub>AR2AC25%</sub> | 2,18          | 5,18   | 5,07    | 4,54    |
| ARG <sub>AR2MG</sub> | 4,76          | 7,27   | 5,53    | 4,85    | ARG <sub>AR1AC</sub>    | 7,57          | 6,00   | 6,49    | 4,25    |
| ARG <sub>ARIMF</sub> | 5,00          | 4,24   | 5,65    | 5,74    | ARG <sub>AR2AC</sub>    | 5,55          | 5,23   | 6,03    | 6,43    |

Com o intuito de averiguar possíveis erros de execução, algumas argamassadas foram confeccionadas novamente, porém, os valores dos desvios padrão permaneceram nos mesmos patamares. Sendo assim, acredita-se que tais resultados sejam razoáveis, uma vez que não se pode exigir de uma argamassa com incorporação de areia reciclada, os mesmos desvios padrão de argamassas confeccionadas apenas com areia normal do IPT. Pois sabe-se, que as areias recicladas são naturalmente heterogêneas, sendo inclusive este, um dos desafios quanto ao seu uso.

#### **A) Resistência à Compressão Axial**

Nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 vê-se os gráficos de ganho de resistência à compressão das argamassas padrão e argamassas recicladas aos 3, 7 e 28 dias. Contudo, as comparações e discussões se voltarão para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias.

Na Figura 4.19 têm-se os gráficos da evolução do ganho de resistência à compressão axial das argamassas padrão e das “frações grossas” das argamassas recicladas.



Figuras 4.19 \_ Evolução do ganho de resistência à compressão das três areias: fração grossa (a), fração média grossa (b).

Comparando os resultados de resistência à compressão das argamassas recicladas com substituição da fração grossa e média grossa, com as argamassas padrão (Figura 4.19); observa-se que as argamassas padrão ( $ARG_{AN}$ ) apresentam resistência à compressão 32% maior que as argamassas  $ARG_{AR1G}$  e 20% maior que as argamassas  $ARG_{AR1MG}$  e  $ARG_{AR2MG}$ . Acredita-se que os menores valores de resistência à compressão das argamassas recicladas, se devam as maiores taxas de absorção de água das “frações grossas” da areia AR1 e da fração média grossa da areia AR2, que foram de 5,4%, 5,2% e 3,9%, respectivamente; em relação as taxas de absorção de água das “frações grossas” da areia AN, que foram 0,2% e 1,0% respectivamente (Tabelas 4.1 e 4.2). Atribui-se também os menores valores de resistência à compressão das argamassas  $ARG_{AR1G}$  e  $ARG_{AR1MG}$ , aos menores valores de massa específica das “frações grossas” da areia AR1 em relação a areia AN, em média 20% menor.

As maiores taxas de absorção de água das areias AR1 e AR2 e os menores valores de massa específica da areia AR1, em relação a areia AN, por sua vez, são atribuídos a camada de pasta de cimento aderida à superfície dos grãos destas frações, identificadas pelas imagens da lupa eletrônica (Figuras 4.7 e 4.11). A camada de pasta de cimento aderida, como já discutido anteriormente, demandaria por maiores quantidades de água, o que faria aumentar a relação água/cimento naquela região. A microestrutura destas argamassas se tornariam mais frágeis naquelas regiões, vindo a afetar a resistência à compressão das argamassas  $ARG_{AR1G}$ ,  $ARG_{AR1MG}$  e  $ARG_{AR2MG}$ .

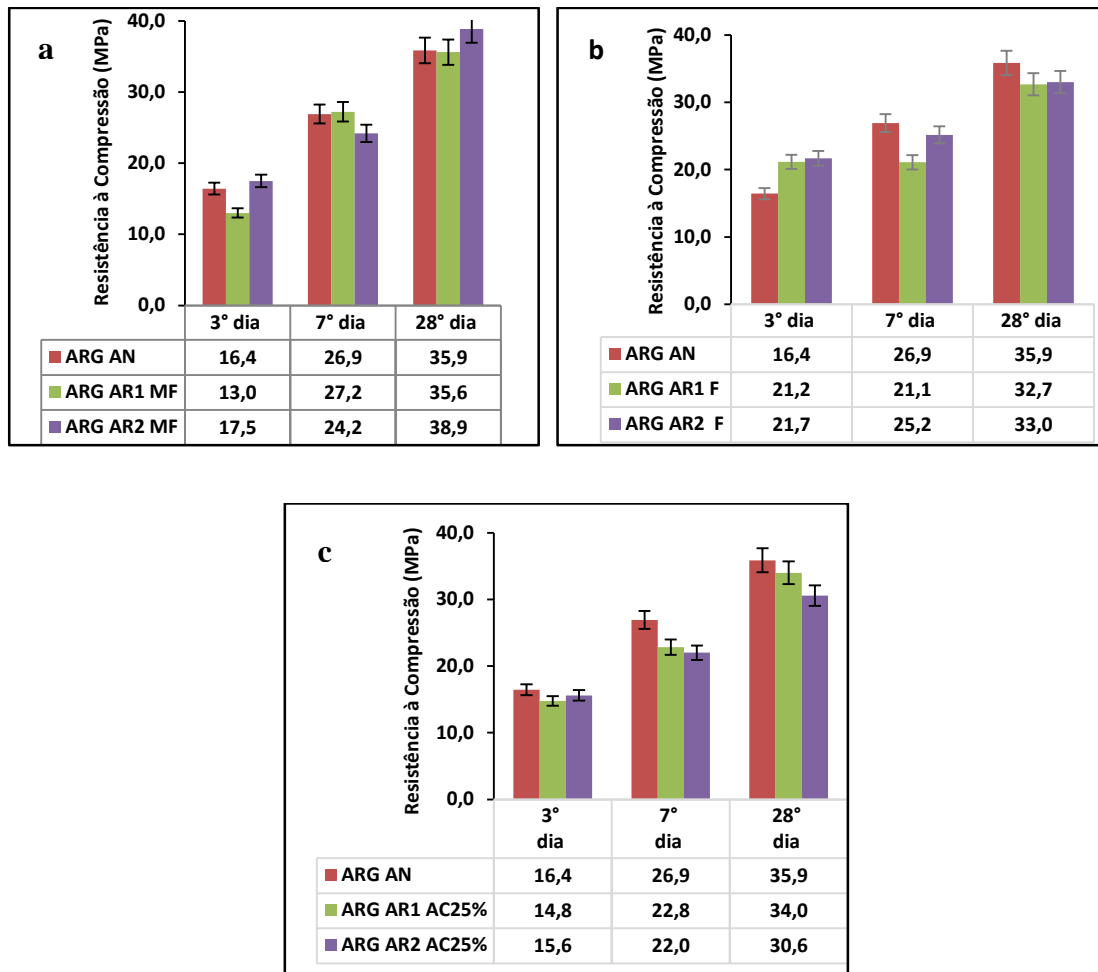
As argamassas  $ARG_{AR2G}$  não apresentam resistência à compressão com diferenças estatísticas significativas em relação às argamassas padrão ( $ARG_{AN}$ ). Atribui-se este resultado ao baixo patamar da taxa de absorção de água da fração grossa da areia AR2 (1,1%) que não veio a impactar negativamente no valor de resistência das argamassas  $ARG_{AR2G}$  em relação  $ARG_{AN}$ .

Comparando as argamassas recicladas com substituição da fração grossa, nota-se que as argamassas  $ARG_{AR1G}$  apresentam resistência à compressão 21,6% menor que as argamassas  $ARG_{AR2G}$  (Figura 4.19 a). Os resultados corroboram com os dados apresentados na Figura 4.2, onde se viu que a taxa de absorção de água da areia AR1 é 79% maior que da areia AR2 e que o valor de massa específica da areia AR1 é 25% menor que da areia AR2. Com estes resultados, é razoável pensar que talvez a fração grossa da areia AR1 apresente maior quantidade de pasta de cimento aderida a seus grãos que a fração grossa da areia AR2.

Estatisticamente não há diferenças significativas entre os valores de resistências à compressão das argamassas  $ARG_{AR1MG}$  e  $ARG_{AR2MG}$  (Figura 4.19 b). Apesar da areia AR1 absorver 5,2% e a areia AR2 absorver 3,9%, esta diferença não foi suficiente para influenciar nos valores de resistência à compressão destas argamassas, para substituições de 25%.

Na Figura 4.20, têm-se os gráficos de evolução do ganho de resistência à compressão axial das argamassas padrão e das argamassas recicladas  $ARG_{AN}$ ,  $ARG_{AR1MF}$ ,  $ARG_{AR1F}$ ,  $ARG_{AR1AC25\%}$ ,  $ARG_{AR2MF}$ ,  $ARG_{AR2F}$  e  $ARG_{AR2AC25\%}$ . Os resultados dos testes estatísticos de resistência à compressão aos 28 dias, mostraram que estas argamassas não apresentam diferenças significativas.





Figuras 4.20 \_ Evolução do ganho de resistência à compressão das argamassas: fração média fina (a), fração fina (b), areia composta 25% (c).

Sendo assim, as argamassas recicladas:  $ARG_{AR1MF}$ ,  $ARG_{AR1F}$ ,  $ARG_{AR1AC25\%}$ ,  $ARG_{AR2MF}$ ,  $ARG_{AR2F}$  e  $ARG_{AR2AC25\%}$ , apresentam resistência à compressão aos 28 dias, semelhante as argamassas padrão ( $ARG_{AN}$ ). Observa-se que no caso das argamassas com substituição da fração média fina, o valor de resistência à compressão chega a ser maior que o das argamassas padrão, cerca de 8% (Figura 4.20 a).

Nota-se que se por um lado, as massas específicas das frações média fina, fina e areia composta, se apresentaram estatisticamente semelhantes (para as areias recicladas e para a areia normal) (Figura 4.2 b), em relação a absorção de água, as areias apresentam diferenças. Estas diferenças vão desde taxas 0,3% e 1,7% na fração fina da areia AN e AR1, até 5,7% na fração média fina da areia AR2 (Figura 4.2 a).

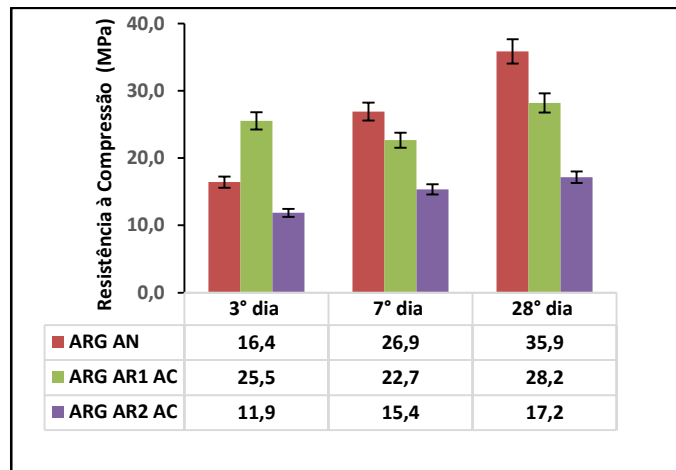
No caso das argamassas recicladas  $ARG_{AR1MF}$ ,  $ARG_{AR1F}$ , uma hipótese para os bons resultados de resistência à compressão alcançados, poderia ser o aumento da presença da

fase mineral nestas frações, observados através das imagens da lupa eletrônica (Figura 4.9), e confirmados através das análises químicas e mineralógicas. (Tabela 4.7, Figura 4.17).

Em relação as argamassas recicladas  $ARG_{AR2MF}$ ,  $ARG_{AR2F}$ , as análises químicas (Tabela 4.7) também comprovaram aumento da fase mineral nas “frações finas”, contudo as imagens do MEV (Figura 4.14) e as análises mineralógicas (Figura 4.18) apontaram também para aumento considerável de pasta de cimento nas “frações finas” da areia AR2. Logo, uma das hipóteses para os bons resultados de resistência das argamassas  $ARG_{AR2MF}$ ,  $ARG_{AR2F}$ , seria de que níveis mais elevados de cimento (hidratado ou não-hidratado), presentes nas “frações finas” da areia AR2 (Tabela 4.7, Figura 4.18), poderiam ter aumentado a quantidade total de cimento na mistura, elevando os valores de resistência à compressão. Pesquisas (KATZ, 2002; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013; SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014) atribuem as melhoras nas propriedades mecânicas dos materiais cimentícios com agregado reciclado às propriedades autocimentantes e à superfície mais rugosa dos mesmos.

Em relação as argamassas recicladas  $ARG_{AR1AC25\%}$ , estas apresentaram valor de resistência à compressão 10% maior que as argamassas  $ARG_{AR2AC25\%}$  e apesar desta diferença não ser estatisticamente significativa, ela mostra que a substituição da areia AR1 na condição areia composta tende a ser mais eficiente que a areia AR2. Sendo assim, acredita-se que a maior massa unitária da areia AR1 em relação a areia AR2 na condição areia composta, possam ter contribuído para este resultado.

Vê-se o gráfico da evolução do ganho de resistência à compressão axial das argamassas padrão e das argamassas recicladas  $ARG_{AN}$ ,  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$  (Figura 4.21).



**Figuras 4.21 \_ Evolução do ganho de resistência à compressão das argamassas da areia composta**

Comparando as argamassas padrão ( $ARG_{AN}$ ), com as argamassas com 100% de areia reciclada;  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ , estas se mostraram estatisticamente diferentes (Figura 4.21). As argamassas  $ARG_{AN}$  apresentam valores de resistência à compressão 21,4% maiores que as argamassas  $ARG_{AR1AC}$  e 52% maiores que as argamassas  $ARG_{AR2AC}$ . Os resultados de resistência à compressão destas argamassas, corroboram com os resultados de caracterização física das areias, que mostraram que as areias AR1 e AR2 absorvem mais água e apresentam menores valores de massa unitária que a areia AN, na condição “areia composta” (Figuras: 4.1 e 4.2).

Uma hipótese para estes resultados, seria que a pasta de cimento aderida, presente em maiores ou menores quantidades, depende da fração granulométrica das areias recicladas \_ demandando por maiores quantidades de água \_ fizeram aumentar a relação água/cimento na região da ZT. A microestrutura destas argamassas se tornaram mais frágeis, afetando a resistência à compressão das argamassas recicladas.

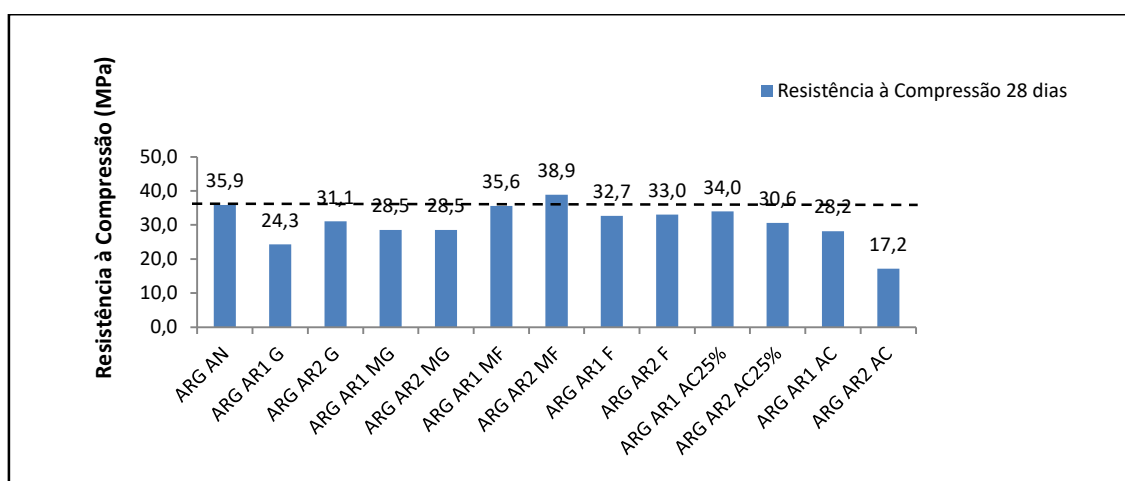
Outra hipótese seria a de que além do aumento da relação água /cimento na região da ZT, houve também aumento efetivo da relação água /cimento de toda a mistura. Logo, os incrementos a mais de água adicionados nesta condição (100% de substituição) elevaram a relação água/cimento, aumentando a porosidade total da argamassa e fazendo com as resistências das argamassas  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$  fossem menores (Lei de Abrams).

Observa-se que as argamassas  $ARG_{AR1AC}$  apresentam valor de resistência à compressão mais próximo das argamassas padrão, que as argamassas  $ARG_{AR2AC}$  (Figura 4.21). Atribui-se tal fato à semelhança nas características físicas da areia AR1, em relação à

areia AN na condição areia composta como: massa unitária, massa específica e fator de empacotamento (Figuras 4.1 e 4.2 e Tabela 4.4), além da proximidade dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro das “frações finas” das areias AN e AR1 (Figura 4.15 a). Contudo, acredita-se que a presença de pasta de cimento nas “frações grossas” da areia AR1, observado principalmente nas imagens da lupa eletrônica (Figura 4.7), fizeram com que as argamassas ARG<sub>AR1AC</sub> apresentassem valor de resistência à compressão 21% menor que as argamassas ARG<sub>AN</sub>.

Analisando os resultados de resistência à compressão das argamassas ARG<sub>AR1AC</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> (Figura 4.21). Observa-se que as argamassas ARG<sub>AR1AC</sub>, apresentaram resistência à compressão 39% maior que as argamassas ARG<sub>AR2AC</sub>. Estes resultados se justificam, pois na condição areia composta, a areia AR1 apresentou valor de massa unitária 8% maior que a areia AR2 (Figura 4.1) e taxa de fator de empacotamento 12% maior que a areia AR2 (Tabela 4.4). Por fim, a areia AR1 apresenta mais de 90% de sílica, alumina e ferro nas “frações finas” (Tabela 4.7). Logo, o melhor arranjo entre as partículas e a menor presença de pasta de cimento endurecida nas “frações finas” da areia AR1 (constatada indiretamente em função da presença de sílica), fizeram com que as argamassas ARG<sub>AR1AC</sub> apresentassem maior valor de resistência à compressão que as argamassas ARG<sub>AR2AC</sub>.

A Figura 4.22 sintetiza os resultados de resistência à compressão das argamassas padrão (ARG<sub>AN</sub>) e recicladas aos 28 dias, sendo que a linha tracejada se refere ao valor de resistência à compressão das argamassas padrão.



Figuras 4.22 \_ Resistência à compressão das argamassas padrão e recicladas.

Com base na Figura 4.22 e nas colocações anteriores constata-se que:

- Os maiores valores de resistência à compressão seriam das argamassas com substituição das “frações finas”; da “areia composta 25%” e da argamassa  $ARG_{AR2G}$ , que não apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação as argamassas  $ARG_{AN}$  (Figura 4.22). Tais resultados mostram que com exceção das “frações grossas” da areia AR1 e da fração média grossa da areia AR2, a resistência à compressão das argamassas com incorporação de 25% de areia reciclada AR1 ou AR2, não causam prejuízo à resistência à compressão das argamassas.
- As argamassas  $ARG_{AR2G}$  apresentaram maior resistência à compressão aos 28 dias que as argamassas  $ARG_{AR1G}$ , sinalizando que a fração grossa da areia AR1 talvez apresente maior quantidade de pasta de cimento aderida a seus grãos que a fração grossa da areia AR2.
- Os menores valores de resistência à compressão aos 28 dias foram os das argamassas com 100% de areia reciclada,  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ . Atribui-se tais resultados a influência das características físicas das areias recicladas em relação à areia de referência na condição “areia composta” em ao percentual de substituição das areias recicladas nas argamassas.
- As argamassas  $ARG_{AR1AC}$  e apresentaram maior resistência à compressão aos 28 dias que as argamassas  $ARG_{AR2AC}$ , justificados em função das características físicas da areia AR1 em relação a areia AR2 na condição “areia composta” e da menor presença de pasta de cimento nas “frações finas” da areia AR1 em relação a areia AR2.
- As incorporações de 25% de areia recicladas, de forma geral, foram efetivas em avaliar a influência das características das frações granulométricas das areias recicladas na resistência à compressão das argamassas. Por outro lado, este teor de substituição não permitiu avaliar com clareza o desempenho da areia AR1 em relação à areia AR2. Ao contrário, nas argamassas com 100% de areia reciclada,

as características físicas das areias mostraram-se influentes nos resultados de resistência à compressão e os desempenhos das areias AR1 e AR2 ficaram claros.

## B) Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Tabela 4.10, apresenta os resultados de resistência à tração aos 28 dias das argamassas padrão e das argamassas recicladas.

**Tabela 4.10: Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias das argamassas padrão e recicladas.**

|            | $ARG_{AR1G}$ | $ARG_{AR1MG}$ | $ARG_{AR1MF}$ | $ARG_{AR1F}$ | $ARG_{AR1AC25\%}$ | $ARG_{AR1AC}$ |
|------------|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------------|---------------|
| $ARG_{AN}$ | 4,02         | 4,48          | 3,93          | 3,89         | 5,43              | 3,59          |
|            | $ARG_{AR2G}$ | $ARG_{AR2MG}$ | $ARG_{AR2MF}$ | $ARG_{AR2F}$ | $ARG_{AR2AC25\%}$ | $ARG_{AR2AC}$ |
| 3,59       | 4,70         | 4,59          | 3,34          | 3,23         | 3,72              | 3,69          |

Os testes estatísticos não mostraram diferenças significativas entre a resistência à tração das argamassas padrão e recicladas, com exceção apenas para as argamassas  $ARG_{AR1AC25\%}$ . Logo não foi possível avaliar a influência das frações ou do tipo de areia reciclada no desempenho das argamassas.

Em relação às argamassas  $ARG_{AR1AC25\%}$ , estas apresentam resistência à tração 33% maior que as argamassas  $ARG_{AN}$ , e 31,5% maior que as argamassas  $ARG_{AR2AC25\%}$ . Talvez algum erro durante a execução ou rompimento destas argamassas ( $ARG_{AR1AC25\%}$ ), possam explicar tal diferença.

Os bons resultados de resistência a tração alcançados pelas argamassas recicladas do presente trabalho, poderiam ser justificadas em função da textura rugosa e da forma irregular, características observadas nas areias AR1 e AR2, através das imagens da lupa eletrônica (Figuras: 4.8, 4.10, 4.12 e 4.14). Pesquisas mostram (KATZ, 2002; BUTTLER, 2003; RATO, 2006; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013; SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014) que a maior rugosidade e a forma irregular dos agregados reciclados favorecem a resistência à tração, pois melhoram sua aderência com a pasta de cimento. Resultados similares aos deste estudo foram encontrados por Evangelista e De Brito (2010), com incorporação de 30% de areia reciclada em argamassas e por Buttler (2003), com incorporações de 50% de areias recicladas em concretos. Os pesquisadores citados acima

também encontraram valores de resistência à tração semelhante entre os corpos de prova de referência e os com areia reciclada.

Adiante seguem comparações entre os resultados deste estudo com de outras pesquisas nacionais e internacionais. Ressalta-se que a pura comparação entre os resultados pode não ser efetiva, se não for levado em consideração as muitas variantes envolvidas. Por exemplo, os agregados reciclados são diferentes, as metodologias aplicadas para determinação de suas propriedades variam, assim como as condições experimentais. Alguns trabalhos por exemplo, optam por ajustes de água, alguns incorporam o agregado na condição seca, outros na condição úmida, outros tentam manter a relação água/cimento com ajustes de água e de cimento, etc. Sendo assim, procurou-se comparar os resultados obtidos aqui, com trabalhos que apresentassem condições razoavelmente equivalentes aos deste trabalho, o que restringiu o número de trabalhos apresentados. Ressalta-se também, que só foram possíveis realizar comparações das argamassas com substituições na condição areia composta (25% e 100%), uma vez que não foram encontrados trabalhos que substituíssem especificamente determinada fração granulométrica em argamassas.

Os pesquisadores: Pedrozo (2008); Malta, Silveira Silva e Gonçalves (2013); Bedoya e Dzul (2015); Restuccia *et al.* (2016); trabalharam com areia reciclada de RCD (fração cinza) e obtiveram resistências à compressão aos 28 dias 20MPa, 22,3 MPa, 30MPa e 40,8MPa, respectivamente, substituindo 25% do agregado da mistura por areia reciclada. As argamassas deste estudo, ARG<sub>ARIAC25%</sub> obtiveram 34,0 MPa de resistências à compressão aos 28 dias. Para a resistência à tração, Pedrozo (2008) e Restuccia *et al.* (2016) encontraram 5,2MPa e 5,8MPa. As argamassas ARG<sub>ARIAC25%</sub> obtiveram 5,4 MPa de resistência à tração.

Para substituições de 100% de areia de RCD (fração cinza) aos 28 dias, Pedrozo (2008) obteve valores para resistência à compressão e à tração de 19,0MPa e 6,7MPa respectivamente. Rodrigues e Fucale (2014) obtiveram resistência à compressão de 20,9MPa. Já Baldusco da Silva *et al.* (2015), obtiveram resistência à compressão de 15,5MPa, e após tratamento por separação de densidade alcançaram 23,5MPa. Bedoya e Dzul (2015), obtiveram valor de resistência à compressão de 20,3MPa. As argamassas ARG<sub>ARIAC</sub> obtiveram 28,2 MPa e 3,6MPa para resistência à compressão e à tração, respectivamente.

Os resultados apresentados a seguir são de pesquisas que trabalharam com areia reciclada de corpos de prova com 100% de substituição e idade de 28 dias. Girardi, Martins Filho e Carasek (2017), por exemplo, obtiveram valores de resistência à compressão e à tração de 27,0MPa e 1,2MPa respectivamente. Katz (2002) obtiveram valores de resistência à compressão e à tração 26,8 MPa e 5,4MPa. Já Evangelista e De Brito (2007), sob condições controladas de granulometria e britagem, obtiveram valores de resistência à compressão e à tração de 54,8 MPa e 2,9 MPa respectivamente. Fan *et al.* (2016) obteve 20,7 MPa, também para resistência à compressão. As argamassas ARG<sub>AR2AC</sub> obtiveram resistência à compressão e à tração de 17,15 MPa e 3,7MPa respectivamente.

Os resultados das pesquisas acima, apresentam variações expressivas entre os estudos, contudo as argamassas ARG<sub>AR1</sub> e ARG<sub>AR2</sub> (na condição areia composta 25% e 100%), apresentam comportamento mecânico compatíveis aos apresentados. Pode-se se dizer que as argamassas com areia AR1 apresentaram resistência à compressão, de forma geral, superiores às demais pesquisas e as argamassas com areia AR2, inferiores. Especula-se que o processo de beneficiamento da areia AR1 (cuja parte aconteceu por via úmida) possa ter contribuído para estes resultados. No caso da areia AR2, acredita-se que a heterogeneidade do material de origem possa ter contribuído com os resultados, pois enquanto as pesquisas com agregados reciclados de concreto costumam utilizar resíduos de corpos de prova de concreto com idade e traços controlados, a areia AR2 foi fabricada com corpos de prova de concreto com diferentes idades, traços e agregados de origens distintas.

#### **4.2.2 Análises das propriedades físicas das argamassas recicladas**

Com idade de 28 dias, três corpos de prova das argamassas padrão e das argamassas recicladas, foram levados à estufa (105C°) por 72hs e na sequência foram submersos em água por mais 72h (ABNT NBR 9778:2009). Ao final dos ensaios, as taxas de absorção de água por imersão, de índice de vazios e os valores das massas específicas: seca, saturada e real, foram calculadas. Os valores das massas intermediárias das treze argamassas se encontram nas Tabelas: D1 a D13, no Apêndice D deste documento.



As Figuras 4.23 a 4.25 apresentam os resultados das propriedades: absorção de água por imersão (%), índice de vazios (%) e massa específica seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), sendo que as linhas tracejadas se referem aos dados das argamassas padrão ( $\text{ARG}_{\text{AN}}$ ).

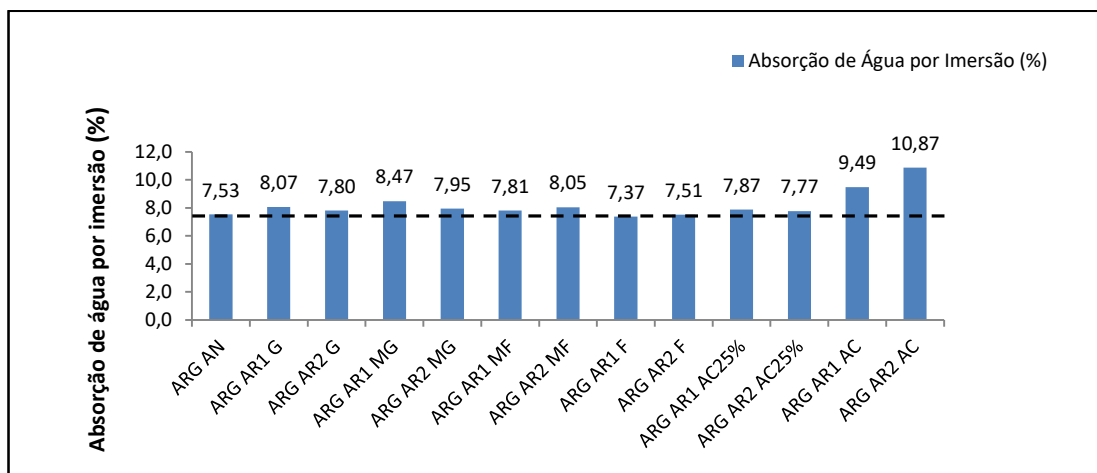


Figura 4.23 \_ Taxas de absorção de água por imersão das argamassas padrão e recicladas.

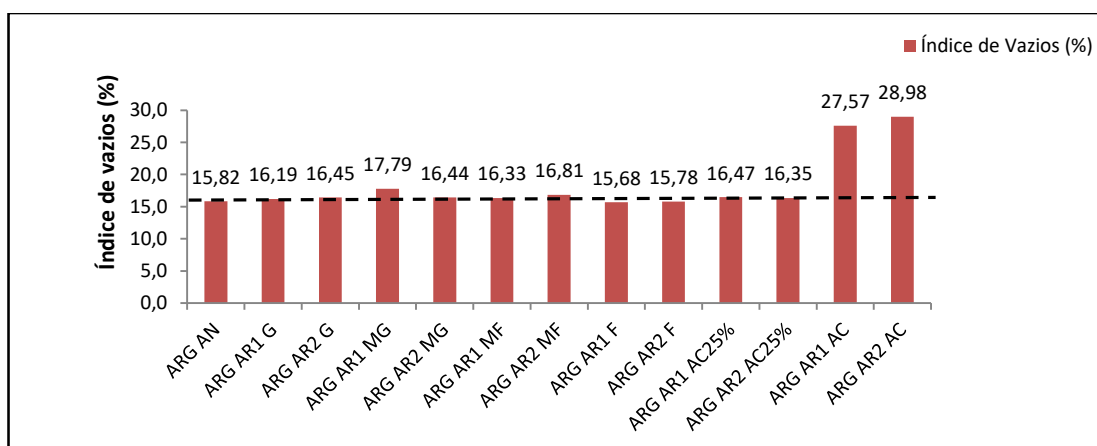


Figura 4.24 \_ Taxas de índices de vazios das argamassas padrão e recicladas.

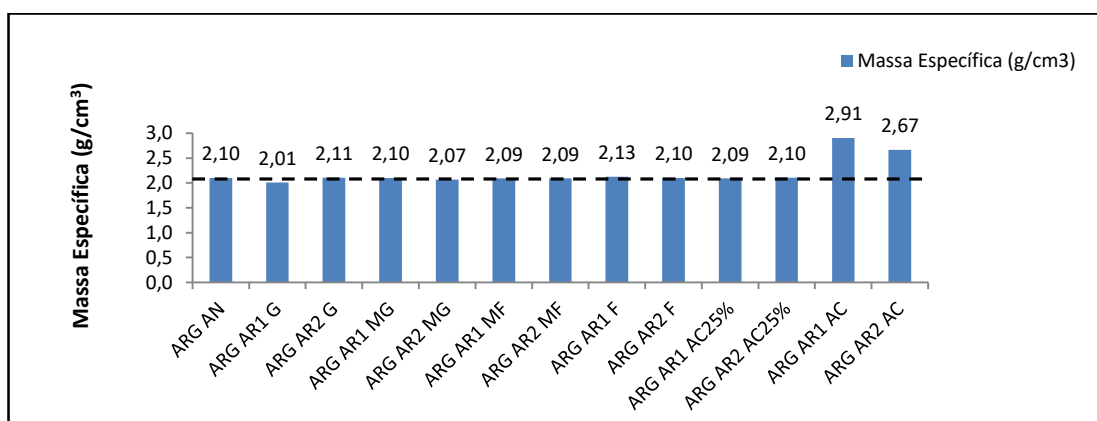


Figura 4.25 \_ Valores de massa específica seca das argamassas padrão e recicladas.

Nesta etapa também foram aplicados os testes estatísticos de duas variáveis: Teste t entre amostras independentes e Teste de Levene. Sendo assim, foi possível testar a homogeneidade da variância e a igualdade das médias dos parâmetros de entrada massas secas, massas SSS e das massas hidrostáticas. Os detalhes das análises estatísticas e resumo dos resultados, se encontram nas Tabelas D15 a D18, do Apêndice D deste documento.

Os testes estatísticos mostraram as argamassas padrão ( $ARG_{AN}$ ) e as argamassas recicladas com 25% de substituição, não apresentam diferenças estatísticas significativas (Figuras: 4.23, 4.24 e 4.25). Logo, as argamassas com 25% de areia reciclada, se comportam de maneira semelhante às argamassas padrão, para as propriedades físicas de: absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica seca. Acredita-se que tais resultados se devam as taxas de substituição de 25% de areia reciclada AR1 ou AR2, que não foram suficientemente altas a ponto de influenciar nas propriedades físicas avaliadas neste estudo.

Comparando os resultados das argamassas padrão ( $ARG_{AN}$ ), com as argamassas recicladas com 100% de substituição ( $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ ) (Figuras: 4.23, 4.24 e 4.25), nota-se que as argamassas com areia reciclada obtiveram desempenhos inferiores as argamassas padrão para as propriedades de absorção de água por imersão e índice de vazios e superiores para a propriedade de massa específica.

Como era esperado, com o aumento do teor de substituição de 25% para 100%, houve também o aumento das taxas de absorção de água por imersão e de índice de vazios das argamassas recicladas (Figuras 4.23 e 4.24). As argamassas recicladas  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$  absorvem respectivamente 20,6% e 30,7% a mais de água que as argamassas padrão e apresentam 42,6% e 45,4% mais índice de vazios que as argamassas padrão (Figuras 4.23 e 4.24). Os resultados corroboram com os apresentados no item 4.2.1 A, que mostram que as argamassas  $ARG_{AR1}$  e  $ARG_{AR2}$  apresentam valores de resistência à compressão 21,4% e 52%, menores que as argamassas padrão ( $ARG_{AN}$ ), respectivamente. Tais resultados, por sua vez, se mostram coerentes com as características físicas das areias na condição areia composta, que mostraram que as areias recicladas absorvem mais água e apresentam menor massa unitária que a areia de referência AN (Figuras 4.1 e 4.2). Nota-se, porém, que as argamassas  $ARG_{AR1}$  apresentam desempenhos físico-mecânico mais

próximos das argamassas padrão que as ARG<sub>AR2</sub>, justificados em função do maior fator de empacotamento dos grãos da areia AR1 e da semelhança de suas “frações finas” com a areia AN.

Os resultados do trabalho, portanto, corroboram com os de outras pesquisas (EVANGELISTA e DE BRITO, 2010; ZEGA e DI MAIO, 2011; MALTA *et al.*, 2013; GAYARRE *et al.*, 2017), que observaram aumentos dos valores destas propriedades com o aumento do teor de incorporação de areia reciclada. Segundo Evangelista e De Brito (2010), isso acontece porque os agregados reciclados costumam ter uma estrutura mais porosa, o que leva a um aumento global dos poros abertos das argamassas. A maior porosidade das areias AR1 e AR2 foram constatadas através das taxas de absorção de água (Figura 4.2), que mostraram que as areias recicladas absorvem cerca de 68% a mais de água que a areia de referência, na condição areia composta. Segundo Rato (2006), a formação de uma estrutura porosa mais conectada, refletiria negativamente nas propriedades físico-mecânicas de argamassas e concretos.

Em relação à massa específica seca, as argamassas recicladas ARG<sub>AR1AC</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> apresentam massa específica maior que as argamassas padrão, 27,8% e 21,34%, respectivamente (Figuras: 4.23, 4.24 e 4.5). Um apanhado literário realizado por Silva, De Brito e Dhir (2014), mostrou que haveria uma diminuição na massa específica da argamassa ou concreto à medida que o conteúdo de agregado reciclado aumentasse na mistura. Neste estudo, ao contrário, observou-se um aumento dos valores de massa específica com o aumento de incorporação de areia reciclada. Uma hipótese que poderia justificar os maiores resultados de massa específica das argamassas ARG<sub>AR1AC</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub>, em relação a ARG<sub>AN</sub> e das ARG<sub>AR1AC</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> em relação às argamassas com 25% de substituição, seriam suas massas específicas reais. Os resultados de DRX (Figuras: 4.16, 4.17 e 4.18) mostram que areia de referência é composta basicamente de quartzo, que tem massa específica 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Já as areias recicladas são compostas além de quartzo, também por calcita, que tem massa específica 2,72 g/cm<sup>3</sup> e dolomita, que tem massa específica que varia de 2,72 g/cm<sup>3</sup> a 3,10 g/cm<sup>3</sup>. Logo, os maiores valores de massas específicas das argamassas recicladas se devem simplesmente à maior densidade dos materiais que compõem as areias AR1 e AR2.

Analisando as argamassas  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ , nota-se que as argamassas  $ARG_{AR1AC}$  absorvem 12,7% a menos de água, têm 5% a menos de índice de vazios e apresentam massa específica 8% maior que as argamassas  $ARG_{AR2AC}$ . Tais resultados corroboram com os resultados do item 4.2.1 A, que mostraram que as argamassas  $ARG_{AR1AC}$  apresentavam valor de resistência à compressão aos 28 dias 39% maior que as  $ARG_{AR2AC}$  (Figura 4.21). Atribui-se também as melhores propriedades físicas das argamassas  $ARG_{AR1AC}$  em relação as argamassas  $ARG_{AR2AC}$  ao maior valor de massa unitária e ao maior fator de empacotamento dos grãos da areia AR1 em relação a areia AR2, na condição “areia composta” (Figura 4.1 e Tabela 4.4).

Compara-se a seguir os resultados de absorção de água por imersão das argamassas  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ , com os de alguns trabalhos que estudaram argamassas com 100% de areia reciclada.

O trabalho Girardi, Martins Filho e Carasek (2017), por exemplo, obteve valores absorção de água por imersão médios de: 14,3% e 16,9% para argamassas com areias de RCD, e uma taxa de 22,9% de absorção de água em argamassas com areia reciclada produzida a partir de corpo de prova de concreto. Martínez *et al.* (2013), trabalharam com RCD de três diferentes construções de Cuba, os pesquisadores encontraram os seguintes valores de absorção de água por imersão em argamassas: 19,3%, 20,3% e 22,7%. Evangelista e De Brito (2010), trabalhando com agregados reciclados beneficiados a partir de corpos de prova de concreto, encontraram 16,5% de absorção de água por imersão.

As argamassas  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ , obtiveram taxas de absorção de água por imersão de 9,47% e 10,87% respectivamente, portanto, abaixo das faixas normalmente encontradas para esta propriedade nas literaturas apresentadas acima. Como os cálculos de absorção de água por imersão e índice de vazios, utilizam variáveis em comum, é razoável pensar que as baixas taxas de absorção de água das argamassas  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ , também resultariam em baixas taxas de índices de vazios destas argamassas.

Como visto na Parte 1 do trabalho, as areias AR1 e AR2 apresentaram de forma geral, taxas de absorção de água consideradas baixas, se comparadas a de outros estudos científicos (Figura 4.2 a). Segundo Gayarre (2008), as maiores taxas de absorção de água

dos agregados reciclados acarretariam aumento da permeabilidade do meio, facilitando o transporte de gases e fluídos pelo interior do material cimentício, que refletiriam em suas propriedades físico-mecânicas. Logo, acredita-se que as baixas taxas de absorção de água da areia AR1 e AR2 indicam indiretamente, menor presença de pasta de cimento nas frações granulométricas destas areias, que refletiram de forma positiva nas propriedades de absorção de água por imersão, em relação a outros trabalhos da área.

#### **4.2.3 Considerações sobre a Parte 2 do Trabalho.**

As argamassas recicladas com 25% ou 100% de substituição, obtiveram resultados de resistência à tração semelhantes às argamassas padrão, influenciados pela forma e textura dos grãos das areias recicladas AR1 e AR2.

As argamassas com 100% de areia reciclada apresentaram desempenhos físico-mecânicos inferiores àquelas com 25% de areia reciclada, devido ao teor de substituição, impulsionados pelas características físicas e mineralógicas e químicas de algumas frações granulométricas.

Nas argamassas com 100% de areia reciclada, e nas argamassas com substituição da fração grossa, observou-se a influência das características físicas e da composição mineralógica e química das areias recicladas nas propriedades das argamassas. Sendo que as argamassas ARG<sub>AR2G</sub> apresentaram resistência à compressão superior as ARG<sub>AR1G</sub> e as argamassas ARG<sub>AR1AC</sub> apresentaram-se superiores as argamassas ARG<sub>AR2AC</sub> nas propriedades de resistência à compressão, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica seca.

Constata-se através do estudo das propriedades físico-mecânicas, que independentemente de serem produzidas a partir de areias de RCD ou RC, argamassas com teor de substituição de 25% de areia reciclada AR1 ou AR2, seja substituindo as “frações finas”, seja na condição “areia composta”, não causam alterações físico-mecânicos às argamassas, pois se comportam de forma similar as argamassas de referência.

O teor de substituição de 25%, não permitiu constatar a influência das diferenças das características das areias AR1 e AR2 (item 4.1) nos comportamentos físico-mecânicos

das argamassas  $ARG_{AR1}$   $ARG_{AR2}$ . Por outro lado, o mesmo foi efetivo no sentido de avaliar a influência das frações granulométricas das areias recicladas no desempenho físico-mecânico de argamassas, mostrando que há diferenças nos comportamentos das argamassas recicladas, conforme a fração granulométrica é substituída.

Neste sentido, o estudo em separado das frações granulométricas obteve êxito, pois mostrou ser viável a substituição de frações específicas de areias recicladas. Sendo assim, amplia-se as possibilidades de aplicação de agregados miúdos reciclados em *designs* de misturas, uma vez que enquadrar os agregados reciclados à curva granulométrica convencional ainda é um desafio da área.

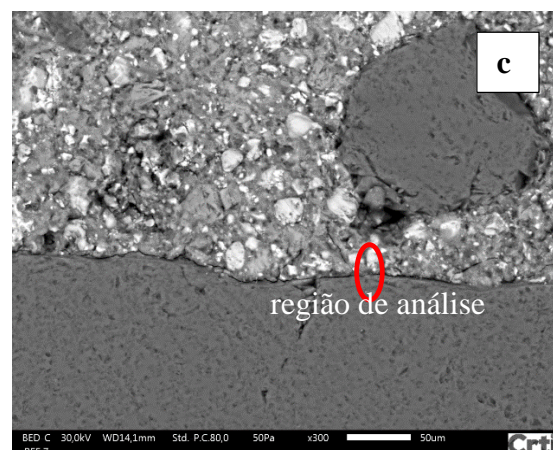
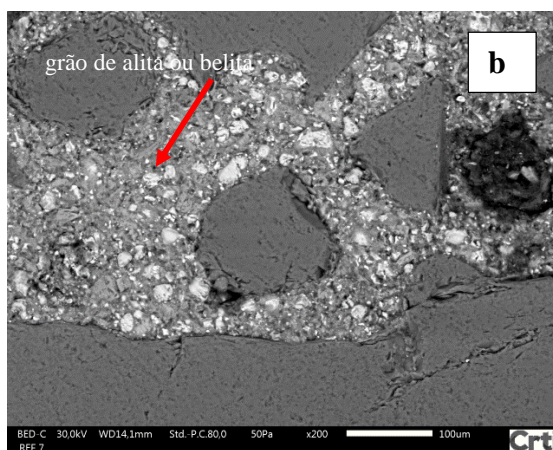
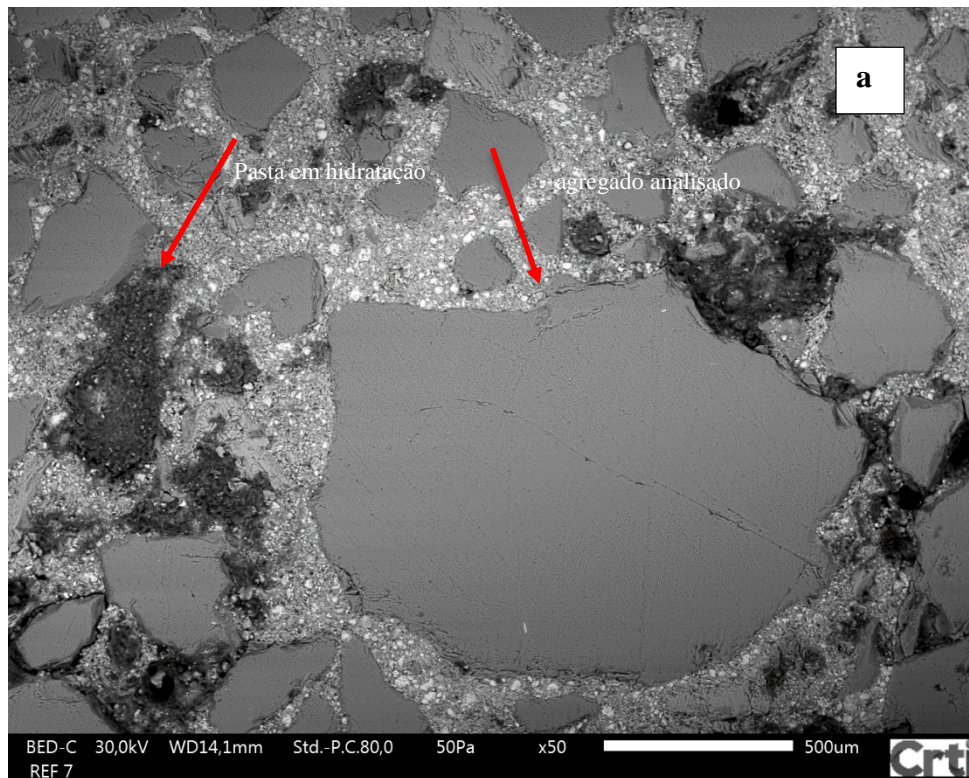
### **4.3 PARTE 3: ANÁLISES MICROESTRUTURAIS DAS ARGAMASSAS RECICLADAS**

O objetivo desta parte do trabalho foi conhecer sobre a microestrutura das argamassas com 100% de areia reciclada ( $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ ) e assim tentar entender seus comportamentos físico-mecânicos. Amostras com idade de 7 dias, foram submetidas às técnicas de: microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS e porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM). Para fins de comparação, amostras das argamassas padrão ( $ARG_{AN}$ ) também foram submetidas às análises.

#### **4.3.1 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com (EDS)**

O objetivo principal da aplicação desta técnica, foi avaliar a configuração da microestrutura das argamassas recicladas, com ênfase na formação da nova zona de transição. Por este motivo as análises foram realizadas em amostras mais jovens, quando haveria maiores chances de observar sua formação. Para tal, traçou-se um perfil ponto a ponto, passando pelas fases: nova zona de transição, argamassa aderida e mineral.

Analisando a amostra da argamassa padrão ( $ARG_{AN}$ ), observa-se na imagem da Figura 4.26 a, que ela é composta por diferentes tamanhos de grãos de agregados em tons de cinza mais forte. Observa-se também, grandes manchas escuras distribuídas de forma aleatória nas imagens (Figura 4.26 a, b e c), baseado em Li *et al* (2017) e Ho *et al* (2018), estas manchas se referem à nova pasta de cimento, ainda em hidratação.



**Figura 4.26 \_ Imagens do MEV da amostra da argamassa ARG<sub>AN</sub>: (a) vista mais ampla da amostra (50X), (b) aproximação da região onde foi realizado o perfil das fases (200X), (c) vista mais próxima da região de análise (300X).**

Também estão presentes na amostra grãos na cor branca, similares aos encontrados por Ho *et al* (2018), que podem se referir aos compostos do cimento não hidratados, alita e/ou belita (Figura 4.26 b). Na Figura 4.26 c faz-se a aproximação da região da zona de transição, onde foi realizado o perfil das fases.

A imagem do MEV da Figura 4.27 a seguir, apresenta um perfil das fases zona de transição/agregado da amostra da argamassa ARG<sub>AN</sub>.



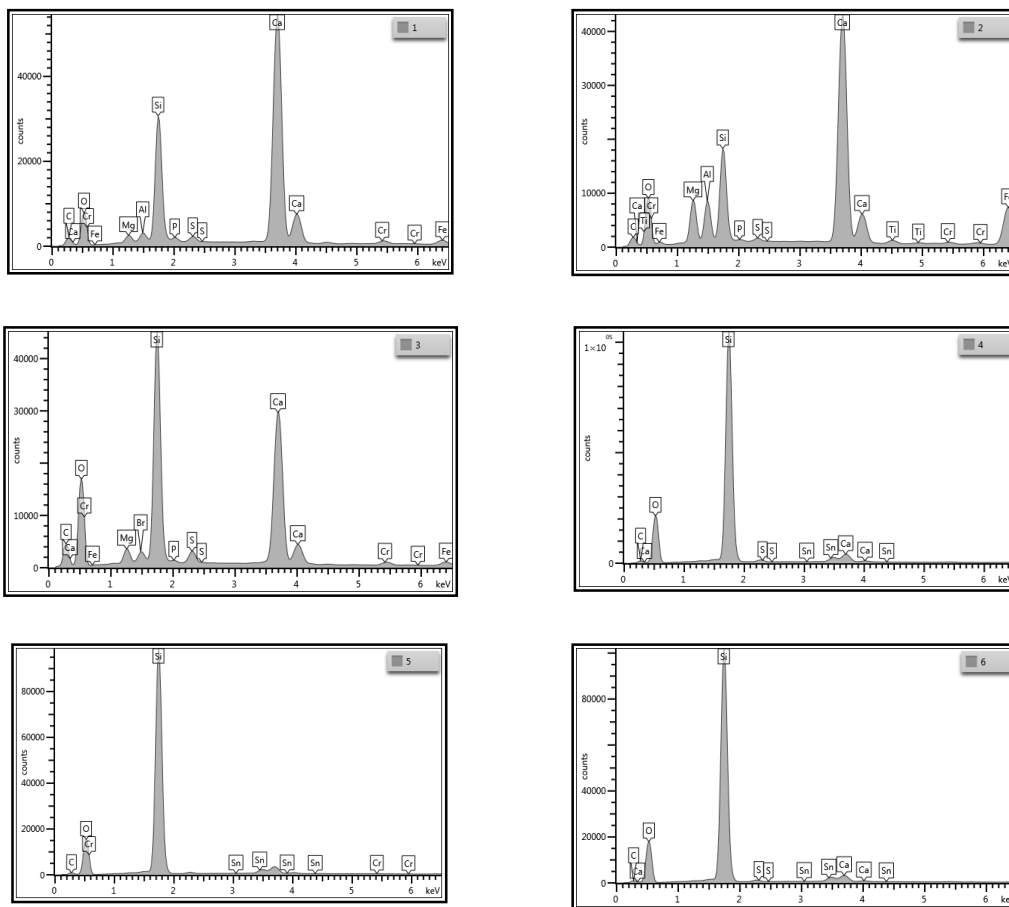
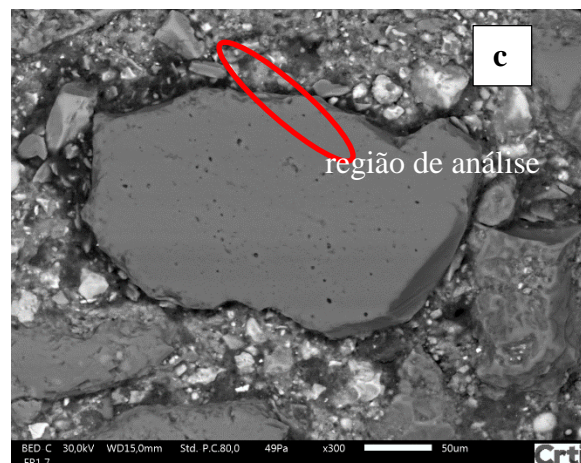
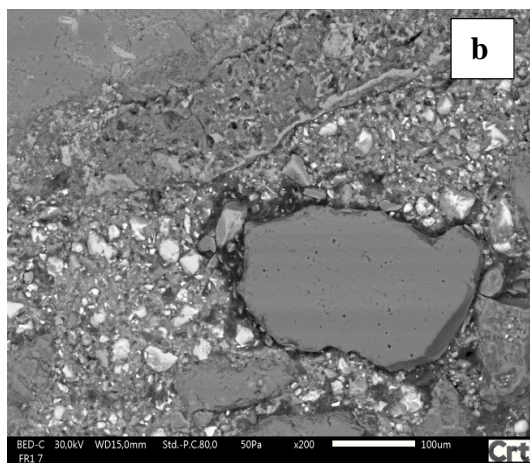
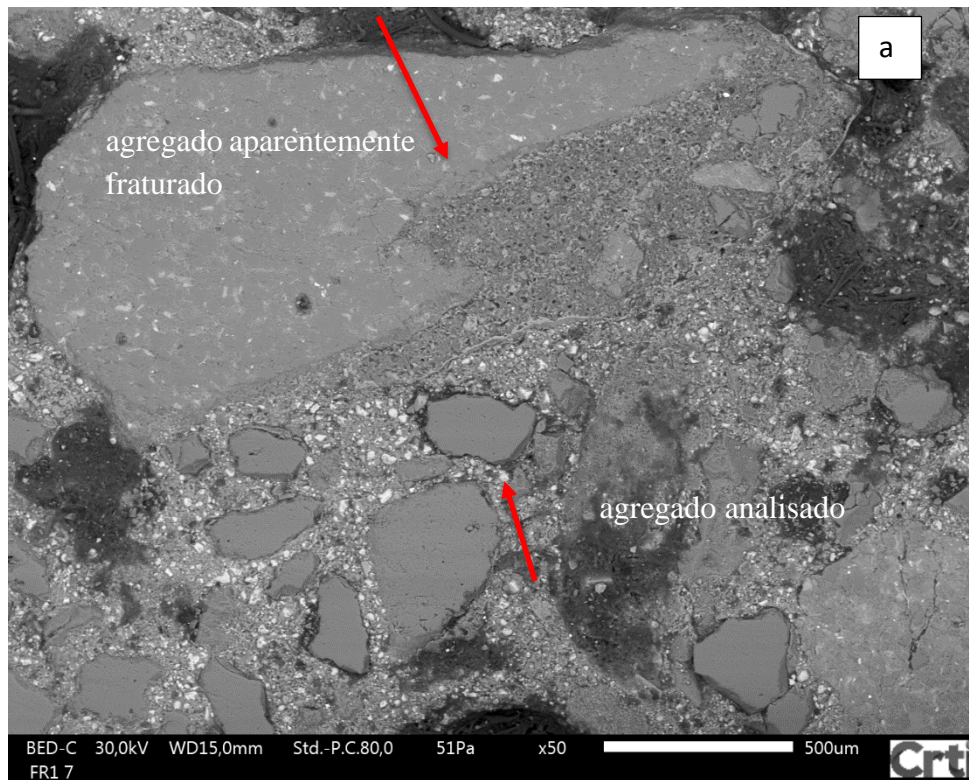


Figura 4.27 \_Imagem do MEV (EDS) da amostra de argamassa ARG<sub>AN</sub>: perfil das fases zona de transição e fase mineral (agregado).

Os espectros de EDS logo abaixo da imagem, se referem aos pontos de 1 a 6 identificados na imagem do MEV (Figura 4.7). A região de cor amarela no mapa com cerca de 30 $\mu$ m de espessura (baseado em TAM, GAO, TAM; 2005 e LI *et al.*, 2017) e que contém os pontos 1, 2 e 3, parece se referir à ZT. Nos pontos 1 e 2, os espectros de EDS mostram picos mais intensos de cálcio (Ca), indicando que o principal produto de hidratação formado nestes pontos de análise é provavelmente o hidróxido de cálcio (CH), vê-se que também há possibilidade de formação silicato de cálcio hidratado (C-S-H), devido a presença de picos de menor intensidade de sílica (Si).

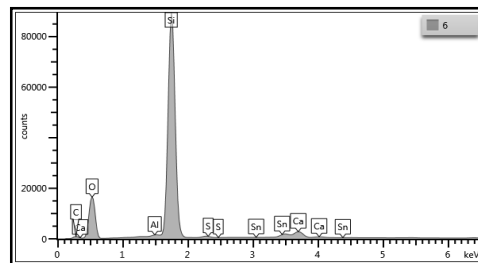
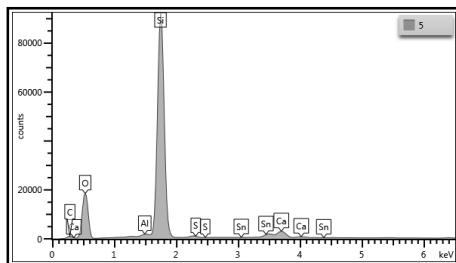
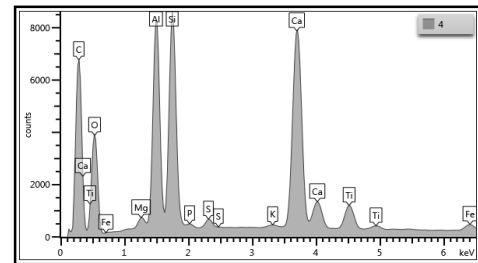
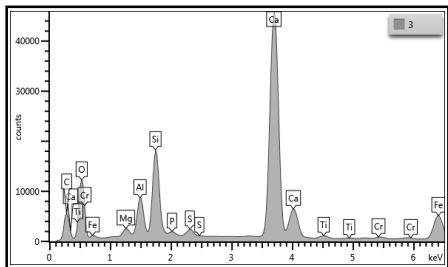
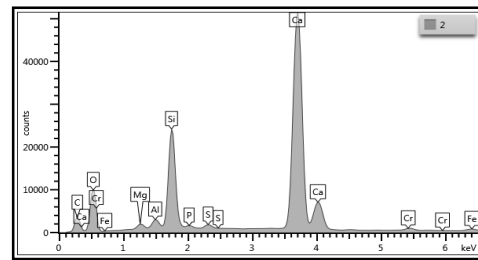
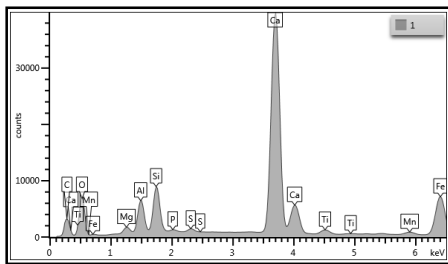
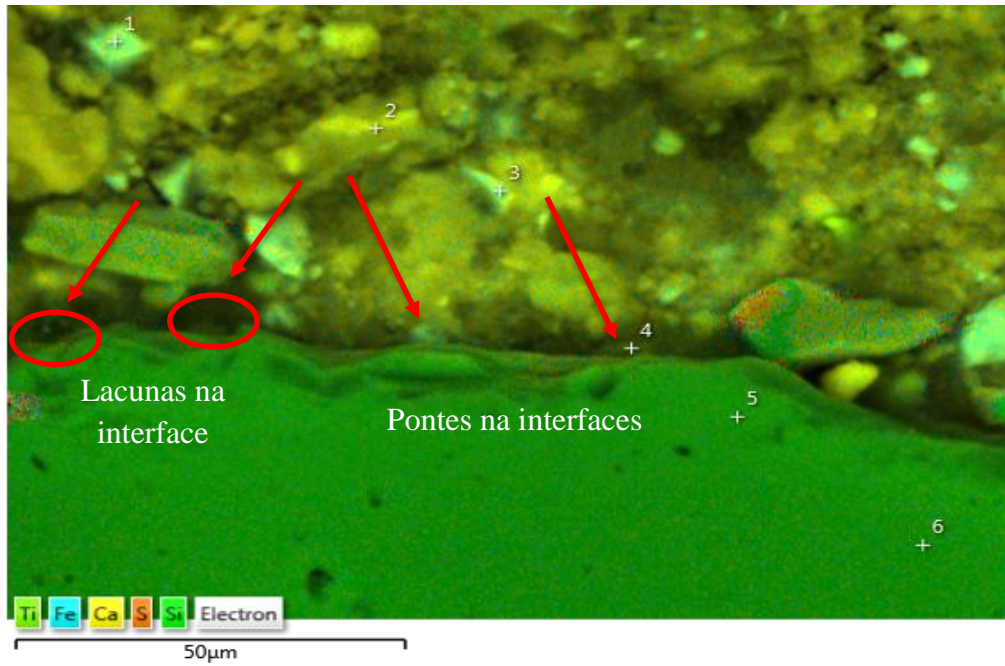
Analisando o ponto 3 da imagem do MEV (Figura 4.27), observa-se que se trata de uma região de fronteira na interface entre as fases (com cerca de 1  $\mu$ m), e como uma “ponte”, conecta as fases (ZT/agregado). O EDS do ponto 3, confirma que se trata da interface, pois observa-se aumento significativo do pico de (Si), que agora tem mesma amplitude do pico de cálcio, indicando provável formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), com possibilidade de formação também de hidróxido de cálcio (CH). A região de cor verde, que contém os pontos 4, 5 e 6, há prevalência de picos de sílica, indicando se tratar do agregado mineral.

Analisando a amostra da argamassa ARG<sub>ARIAC</sub> na Figura 4.28 a seguir, vê-se que esta argamassa, assim como a ARG<sub>AN</sub>, também é composta por diferentes tamanhos de grãos de agregado, os grãos de cor branca, provavelmente os compostos não hidratados do cimento alita e/ou belita e as grandes manchas escuras, provavelmente se referem a nova pasta de cimento em hidratação. Nas imagens da Figura 4.28 b, c; faz-se a aproximação da região do grão e entorno, onde foi realizado o perfil das fases.



**Figura 4.28 \_ Imagens do MEV da amostra da argamassa ARG<sub>ARIAC</sub>: (a) vista mais ampla da amostra (50X), (b) aproximação da região onde foi realizado o perfil das fases (200X), (c) vista mais próxima da região de análise (300X).**

A imagem do MEV da Figura 4.29 a seguir, apresenta os pontos de 1 a 6 distribuídos de forma linear no mapa, formando um perfil das fases da argamassa ARG<sub>ARIAC</sub>.



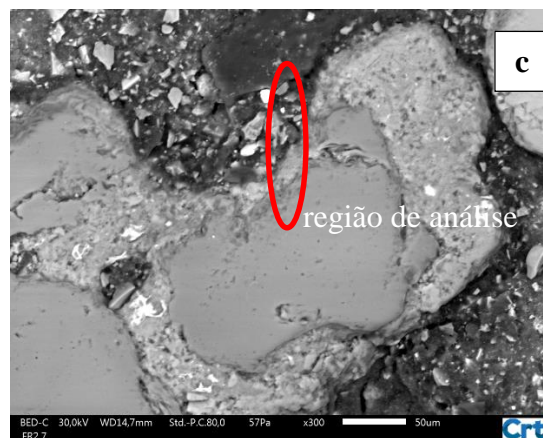
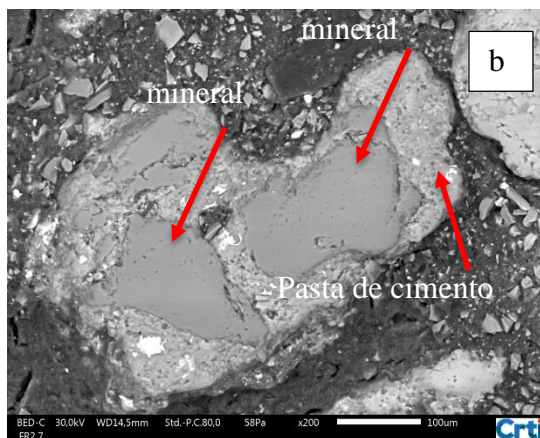
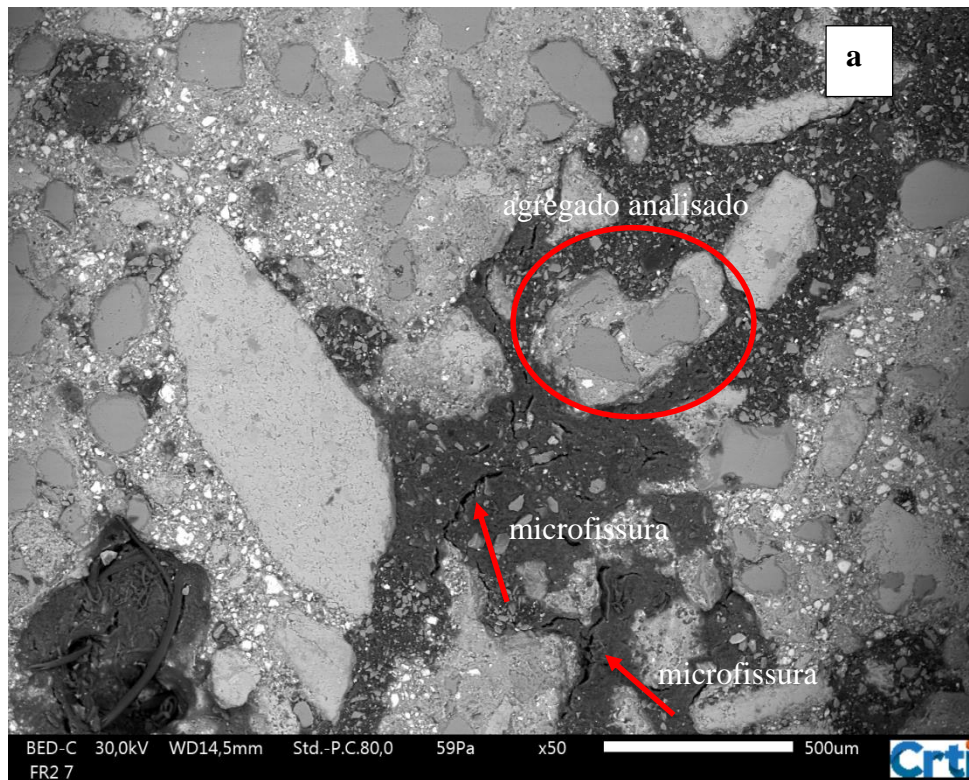
**Figura 4.29 \_ Imagem do MEV (EDS) da amostra da argamassa ARG<sub>ARIAC</sub>: perfil das fases zona de transição e fase mineral (agregado).**

Analisando os espectros gerados pelos EDS da Figura 4.29, a sequência dos pontos 1, 2, 3 e 4 provavelmente se trata da zona de transição (ZT), com espessuras variando dentro

da faixa proposta pela literatura. Nestes pontos, sobressaem os picos de cálcio (Ca), com aumentos gradativos dos picos de sílica (Si). Logo, provavelmente o principal produto formado seria o hidróxido de cálcio (CH) e em menor quantidade, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sendo que, este tenderia a aumentar com a proximidade do agregado mineral. O ponto 4, de acordo com a imagem, se refere a interface (ZT/agregado), este ponto apresenta picos de sílica, cálcio e alumínio de mesma intensidade, indicando provável formação dos produtos de hidratação do cimento C-S-H, como também etringita (AFt), e CH. Por fim, nos pontos 5 e 6 prevalecem os picos de sílica, indicando se tratar do agregado mineral.

Além das amostras de argamassa ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>ARIAC</sub> apresentarem aspectos gerais semelhantes (Figuras 4.26 e 4.28), as zonas de transição de ambas as amostras também se assemelham. Em relação as configurações das ZT, elas se apresentam com aspecto ondulado e poroso. Na interface, é possível visualizar a presença de fendas com presença de “pontes” que fariam a interligação das fases agregado/ZT. Em relação à composição química, os EDS das duas amostras também se mostram semelhantes (Figuras 4.27 e 4.29).

Analisando a amostra da argamassa ARG<sub>AR2AC</sub> na Figura 4.30 a seguir, vê-se além dos aspectos de configuração gerais, já observados nas amostras ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>ARIAC</sub>, observa-se a presença de microfissuras (Figura 4.30 a). Nota-se também um grão que parece ser de areia reciclada, composta por dois minerais, cercados por pasta de cimento (Figura 4.30). Nas Figuras 4.30 b e c faz-se a aproximação da região do grão e entorno, onde foi realizado o perfil das fases.



**Figura 4.30 \_ Imagens do MEV da amostra da argamassa ARG<sub>AR2AC</sub>: (a) vista mais ampla da amostra (50X), (b) aproximação do grão de areia reciclada composta por dois minerais e a ZT antiga (200X), (c) vista mais próxima da região de análise (300X).**

A imagem do MEV da Figura 4.31 a seguir, apresenta os pontos de 1 a 6 distribuídos de forma linear no mapa, formando um perfil das fases da argamassa ARG<sub>AR2</sub>. Contudo, não foi possível identificar na imagem a antiga zona de transição na antiga pasta de cimento.

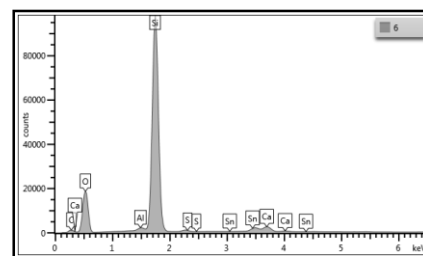
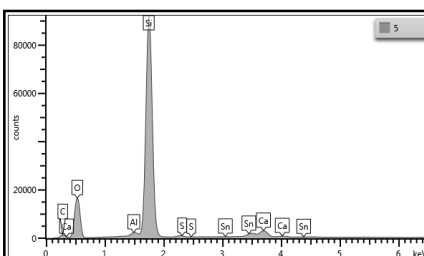
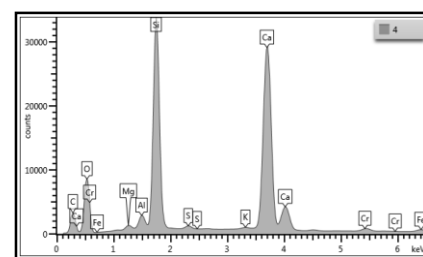
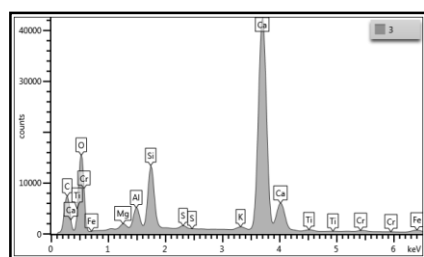
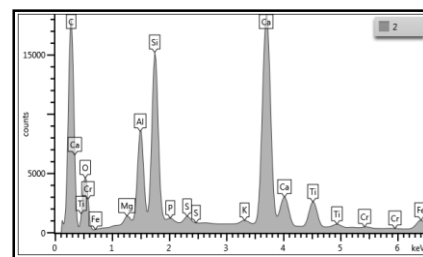
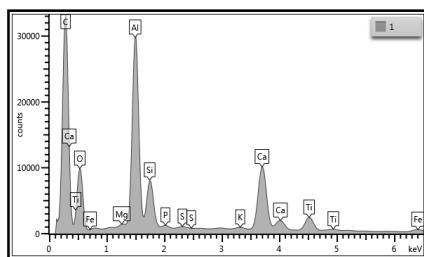
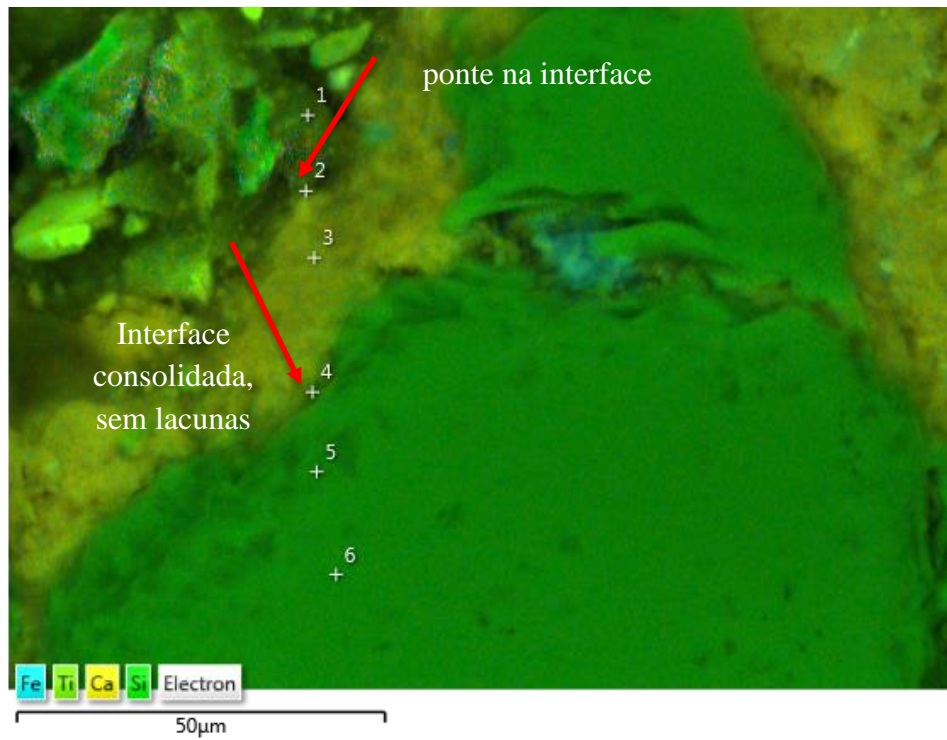


Figura 4.31 \_ Imagens do MEV (EDS) da amostra da argamassa ARG<sub>AR2AC</sub>: perfil detalhado das fases: agregado (mineral e antiga pasta de cimento) e a nova zona de transição.

O ponto 1 na Figura 4.31, se refere provavelmente a nova zona de transição, nota-se que a região tem aspecto ondulado e aparentemente poroso, como as ZT das amostras das argamassas (ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>ARIAC</sub>).

Os pontos de 2 a 6, provavelmente se referem ao grão de areia reciclada, observa-se que a superfície deste grão é composta por uma parte em cor amarela (fase antiga pasta de cimento) e a outra em cor verde (fase mineral). Em relação ao aspecto da pasta de cimento (cor amarela), observa-se que a superfície parece menos porosa (ponto 3); mais consolidada do que a superfície da nova zona de transição (ponto 1).

Analisando os espectros de EDS deste perfil (Figura 4.31), o ponto 1 (nova zona de transição), sobressai o pico de alumínio (Al), indicando a formação da etringita (AFt) para os picos de menor intensidade, tem-se o cálcio (Ca) e a sílica (Si), indicando que talvez também haja a formação de pequenos colóides de hidróxido de cálcio (CH) e /ou silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Na sequência, o ponto 2 é representado por picos de mesma intensidade de cálcio (Ca) e sílica (Si), indicando se tratar da interface entre a nova zona de transição e a antiga pasta de cimento. Logo, o principal produto formado no ponto 2 seria o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e talvez também haja formação do hidróxido de cálcio (CH). Observa-se que também a possibilidade de formação de menores quantidades de etringita (AFt) nesta região, devido à presença do pico de alumínio (AL).

No EDS do ponto 3, vê-se um pico intenso de cálcio (Ca), pela imagem esta região em tom amarelado se refere a antiga pasta de cimento, aderida ao grão de areia reciclada. De acordo com a intensidade do pico de cálcio (Ca) no EDS, provavelmente há formação de grande quantidade de hidróxido de cálcio (CH), porém, vê-se também a possibilidade de formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), devido a presença de um pequeno pico de sílica (Si). Nota-se que a antiga pasta de cimento se apresenta de forma menos rugosa, e aparentemente mais consolidada, se comparada a pasta de cimento na nova zona de transição (Figura 4.31).

Apesar de não ser possível identificar a antiga ZT, a imagem mostra que o ponto 4 se trata da interface (antiga zona de transição / fase mineral). No EDS do ponto 4 observa-se picos



de sílica (Si) e cálcio (Ca) com intensidades praticamente idênticas, provavelmente há formação de grande quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) neste ponto, confirmando se tratar de uma região de interface. Na região de interface (entre a antiga ZT e a fase mineral), não foi observada a presença de lacunas, como na região de interface (entre a nova ZT e a antiga pasta de cimento). De acordo com Leite e Monteiro (2016), esta seria a região mais frágil na antiga ZT, devido à sua maior porosidade, contudo a imagem (Figura 4.31) mostra ao contrário, uma região mais consolidada.

Nos pontos 5 e 6 sobressaem-se os picos de sílica (Si), portanto estes pontos se referem a fase mineral da areia reciclada (Figura 4.31). Os picos de sílica (Si), mostram que o mineral identificado na amostra é um quartzo. Ressalta-se que apesar da areia AR2 conter rocha de origem calcária, também contém rochas de origem ígnea, pois as análises de DRX mostraram que o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), juntamente com a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) são as fases cristalinas de maior intensidade de pico da areia AR2 (Figura 4.16).

Em relação às microfissuras, identificadas na amostra  $\text{ARG}_{\text{AR2AC}}$ , uma hipótese é que elas tenham surgido devido a presença da antiga pasta de cimento e da presença de finos, ambos crescentes com a diminuição da granulometria da areia AR2 (Tabela 4.2 e Figura 4.14). De acordo com Buttler (2003), as microfissuras podem ocorrer em misturas recicladas, devido a retração por secagem, que por sua vez estão relacionadas, segundo Rosa (2013), ao teores elevados de finos. Como a antiga pasta de cimento e os finos, são materiais porosos, eles demandariam por maiores quantidades de água, diminuindo a quantidade de água necessária para hidratação dos constituintes de cimento; o que levaria ao aparecimento de microfissuras próximas a estas regiões (Figura 4.30).

Em síntese, as imagens do MEV mostraram que de forma geral as amostras das argamassas  $\text{ARG}_{\text{AN}}$ ,  $\text{ARG}_{\text{ARIAC}}$  e  $\text{ARG}_{\text{AR2AC}}$  apresentam configurações com aspectos semelhantes (Figuras 4.26, 4.28 e 4.30), contudo na amostra da argamassa  $\text{ARG}_{\text{AR2AC}}$ , nota-se a presença de microfissuras e da antiga pasta de cimento aderida ao grão (Figura 4.31).

Em relação às novas zonas de transição, estas se mostram semelhantes, nas três amostras, com aspecto ondulado e aparentemente poroso (Figuras 4.27, 4.29 e 4.31). Quanto aos prováveis produtos formados nesta região, nas amostras  $\text{ARG}_{\text{AN}}$ ,  $\text{ARG}_{\text{ARIAC}}$  seria o CH

e na amostra ARG<sub>AR2AC</sub> seria a AFt. Segundo Leite (2001), Lee e Choi (2013), devido a textura rugosa dos agregados reciclados, esta região seria de melhor qualidade que aquela formada entre o agregado natural e a matriz cimentícia (argamassa padrão). Contudo, não foi possível observar tais diferenças, acredita-se que devido à idade das análises.

Por outro lado, foi possível observar que as novas ZT das amostras ARG<sub>ARIAC</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> não apresentam vazios ou bolhas de ar (Figuras 4.28 e 4.30). Segundo Dodds *et al.* (2017), agregados reciclados com maior capacidade de absorção de água, seriam mais susceptíveis a liberar ar durante o início processo de cura, o que criariam vazios adicionais à mistura, reduzindo a capacidade da nova pasta de cimento de aderir à superfície agregados, vindo a prejudicar a qualidade da nova zona de transição. Segundo Leite e Monteiro (2016), tal fato poderia vir a ser intensificado, com a incorporação dos agregados na condição seca. Acredita-se que mesmo sendo incorporadas à mistura na condição seca, as areias AR1 e AR2 não liberaram ar na mistura em função de suas menores taxas de absorção de água das areias em relação à de outras pesquisas (ver item 4.1).

Especificamente na região de interface, entre a nova zona de transição e o agregado, as imagens do MEV mostram a presença de lacunas, nas três amostras. Segundo Mehta e Monteiro (2014), estas lacunas não permitiriam a transferências de tensão, portanto seriam a princípio, elos mais frágeis. As imagens do MEV mostram a presença de “pontes” nesta região, estas “pontes” apresentam picos de sílica e cálcio de intensidades semelhantes, indicando a formação de maiores quantidades de C-S-H nestes pontos de fronteira. Como se sabe, o silicato de cálcio hidratado seria responsável pela resistência do material cimentício. Logo, é razoável pensar que estas “pontes” representariam pontos de maior resistência nesta região mais frágil. Com o avanço da idade, pode ocorrer um fortalecimento da zona de transição, pela absorção de água da mistura, o que proporcionaria a migração dos produtos de hidratação para dentro do agregado reciclado e conseqüentemente para a zona de transição (POON, SHUI e LAM, 2004). Sendo assim, acredita-se que novas “pontes” se formariam com o avanço da idade, tornando a região mais consolidada, sem a presença de lacunas, como na interface entre a antiga ZT e a fase mineral da amostra ARG<sub>AR2AC</sub> (Figura 4.31).

Os resultados de resistência à compressão apresentados na Figura 4.25 do item 4.2.1, mostraram que as argamassas  $ARG_{AN}$ ,  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$  com idade de 7 dias, apresentam ganho de resistência à compressão de respectivamente: 26,9MPa, 22,7MPa e 15,4MPa. Tais resultados corroboram com as análises do MEV(EDS), que mostraram que a amostra da argamassa  $ARG_{AR2AC}$ , apresenta microfissuras e pasta de cimento aderida, portanto, com possibilidade de formação de maiores quantidades de CH; o que justificaria seu menor valor de resistência à compressão (15,4MPa), em relação às outras amostras.

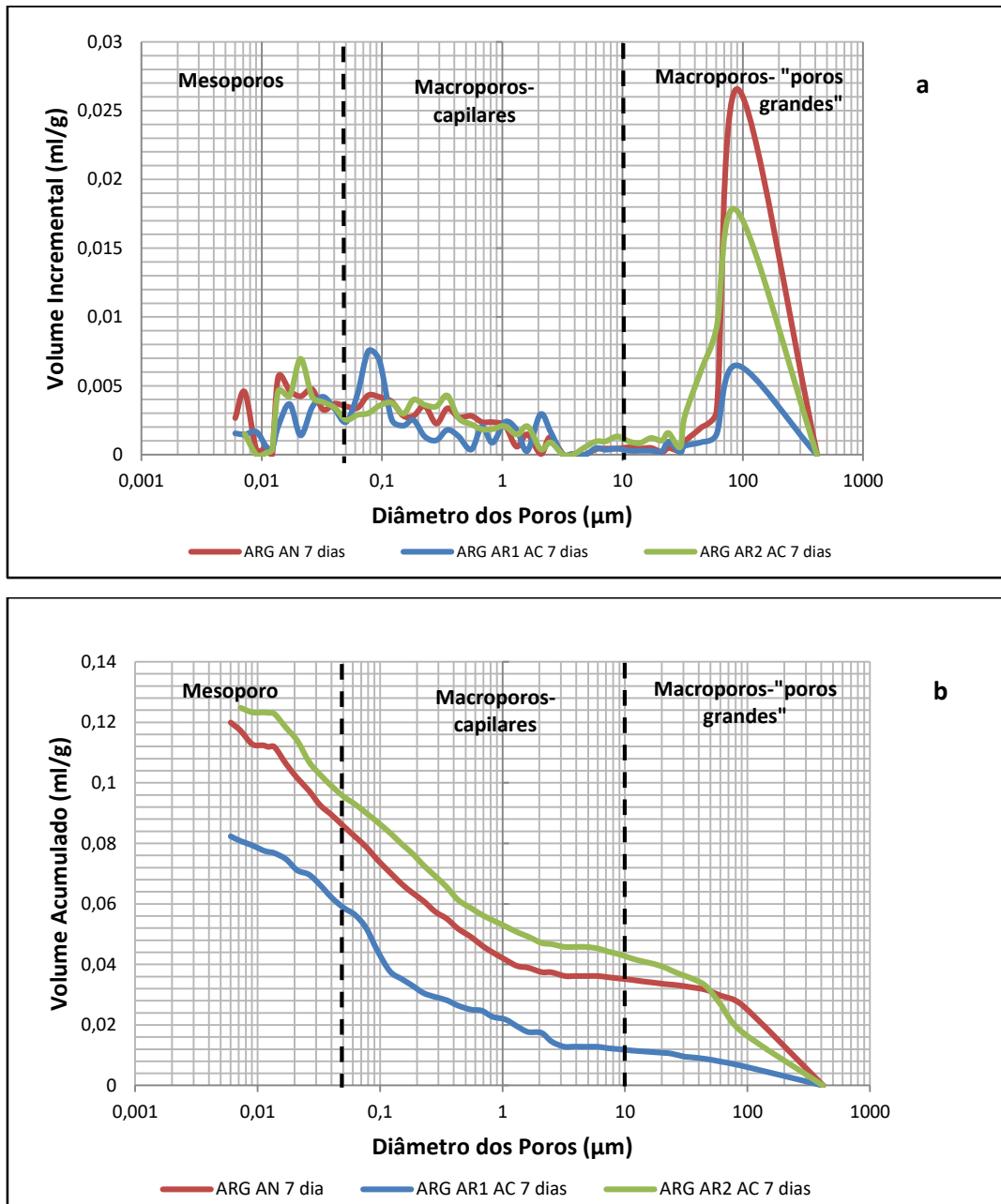
Por outro lado, nota-se que as argamassas  $ARG_{AN}$  e  $ARG_{AR1AC}$  apresentam configurações bastante semelhantes. Estas semelhanças seriam atribuídas às semelhanças entre os fatores de empacotamento dos grãos e massa unitária das areias AN e AR1, na condição areia composta e às semelhanças químicas de suas “frações finas”. Contudo, apesar das semelhanças, nota-se que a argamassa  $ARG_{AN}$  apresenta resistência à compressão aos 7 dias superior à argamassa  $ARG_{AR1AC}$ . Seria razoável pensar que \_ apesar de não ter sido identificada na amostra submetida ao MEV (EDS) \_ a presença de pasta de cimento, presente especialmente nas “frações grossas” da areia AR1, tenha prejudicado o comportamento mecânico da argamassa  $ARG_{AR1AC}$ .

Em relação as diferenças entre as microestruturas das amostras  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ , estas são atribuídas ao melhor arranjo entre as partículas da areia AR1 em relação à AR2, a maior massa unitária da areia AR1 em relação a areia AR2, na condição areia composta, além da menor presença de pasta de cimento endurecida nas “frações finas” da areia AR1, em relação a areia AR2.

#### **4.3.2 Caracterização da Estrutura Porosa por Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)**

A aplicação desta técnica teve como objetivo conhecer a estrutura porosa de amostras das argamassas recicladas ( $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ ), comparando-as com a amostra  $ARG_{AN}$ , que também foi submetida à análise. Com os resultados obtidos nos ensaios de PIM, realizados em amostras com idades 7 dias, foi possível caracterizar o diâmetro dos poros, associando-os ao volume de mercúrio intrudido.

A seguir, traça-se primeiramente uma descrição comparativa entre as argamassas, e na sequência faz-se a discussão, tomando como base as informações apresentadas na Figura 4.32 e na Tabela 4.11. Sendo que a Figura 4.32, apresenta os resultados da distribuição incremental e acumulada do volume de poros e a Tabela 4.11 apresenta os parâmetros de caracterização dos poros, com as porcentagens das faixas dos poros em função do volume de mercúrio intrudido.



**Figura 4.32** \_ Amostras das argamassas  $ARG_{AN}$ ,  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ : (a) distribuição incremental de volume de poros, (b) distribuição acumulada do volume de poros.

**Tabela 4.11: Parâmetros de caracterização dos poros das amostras das argamassas.**

| <b>Parâmetros de caracterização</b>         | <b>ARG<sub>AN</sub></b> | <b>ARG<sub>ARIAC</sub></b> | <b>ARG<sub>AR2AC</sub></b> |
|---|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )            | 0,049                   | 0,050                      | 0,048                      |
| Volume total dos poros (ml/g)               | 0,120                   | 0,082                      | 0,125                      |
| Porosidade Total (%)                        | 25,0                    | 19,0                       | 25,0                       |
| Volume de macroporos “poros grandes” (ml/g) | 0,035                   | 0,012                      | 0,042                      |
| Macroporos “poros grandes” (%)              | 29,1                    | 14,0                       | 33,6                       |
| Volume de macroporos capilares (ml/g)       | 0,051                   | 0,047                      | 0,053                      |
| Macroporos capilares (%)                    | 42,3                    | 57,3                       | 42,8                       |
| Volume de macroporos totais (ml/g)          | 0,086                   | 0,059                      | 0,095                      |
| Macroporos totais (%)                       | 71,4                    | 71,3                       | 76,5                       |
| Volume de mesoporos (ml/g)                  | 0,034                   | 0,024                      | 0,029                      |
| Mesoporos (%)                               | 28,6                    | 28,7                       | 23,5                       |

Conforme apresentado no capítulo 3, a DIN 66131 (1973) classifica os poros de acordo com suas dimensões em microporos, mesoporos e macroporos. Para argamassas, as faixas de tamanhos de poros que se investiga são os macroporos ( $>0,05\mu\text{m}$ ) e os mesoporos ( $0,002\mu\text{m}$  a  $0,05\mu\text{m}$ ). Baseando-se em Salomão (2016), para melhor compreensão dos comportamentos das argamassas deste estudo, os macroporos foram divididos em: macroporos capilares ( $0,05\mu\text{m}$  a  $10\mu\text{m}$ ) e macroporos “poros grandes” (maiores que  $10\mu\text{m}$ ).

Analisando as amostras das argamassas na faixa de macroporos “poros grandes” (Figura 4.32 a), a distribuição incremental mostra que os maiores picos estão nesta faixa de poros, com diâmetros que variam de  $60\mu\text{m}$  e  $400\mu\text{m}$ , com picos máximos em torno de  $90\mu\text{m}$  (diâmetro dos poros), para as três argamassas. Sendo que, os maiores picos são os das amostras das argamassas ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> e o menor pico é o da argamassa ARG<sub>ARIAC</sub> (Figura 4.32a).

Observa-se na Tabela 4.11, o volume desta faixa de poros e seu respectivo percentual, em relação a porosidade total: ARG<sub>AN</sub> (0,035ml/g e 29,1%), ARG<sub>ARIAC</sub> (0,012ml/g e 14%) e a ARG<sub>AR2AC</sub>, (0,042 ml/g e 33,6%). Percebe-se que a amostra da argamassa ARG<sub>ARIAC</sub> apresenta o menor percentual de “poros grandes”, seguida pelas amostras das argamassas ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> (Figura 4.32 a e Tabela 4.11).

De acordo com Gayarre (2008), com aumento dos macroporos, há também aumento da permeabilidade do material, o que facilitaria o transporte de fluídos pelo seu interior. Logo, o transporte de fluídos seria mais favorecido nas argamassas ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> e mais restringido na argamassa reciclada ARG<sub>ARIAC</sub>.

Na faixa de macroporos capilares (Figura 4.32 a), vê-se inúmeros picos tortuosos, cobrindo toda faixa capilar. O volume total de poros nesta faixa, e seu respectivo percentual em relação a porosidade total são respectivamente: ARG<sub>AN</sub> (0,051ml/g e 42,3%), ARG<sub>ARIAC</sub> (0,047ml/g e 57,3%) e ARG<sub>AR2AC</sub>, (0,053 ml/g e 42,8%) (Tabela 4.11). A amostra da argamassa ARG<sub>ARIAC</sub> apresenta maior percentual de poros capilares dentre as argamassas e as argamassas ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> apresentam praticamente o mesmo percentual de poros capilares.

Os poros capilares, juntamente com os poros grandes, são responsáveis pelo transporte de fluídos no interior da argamassa. Contudo, segundo Rato (2006) é aceitável a ideia de que numa determinada argamassa, os poros de maiores dimensões seriam os da interface, onde existiria uma maior conectividade. Com isso, o fenômeno da percolação aconteceria primeiramente nos “poros grandes” e só depois seguiria para os poros capilares. Como a argamassa ARG<sub>ARIAC</sub>, apresenta maior quantidade de poros capilares e menor quantidade de “poros grandes”, que as argamassas ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub>, o transporte de fluídos seria mais favorecido nestas argamassas e mais restringido na argamassa reciclada ARG<sub>ARIAC</sub>.

Na faixa de mesoporos (Figura 4.32 a, Tabela 4.11), também se vê inúmeros picos tortuosos, cobrindo a faixa de dimensão de 0,005 µm a 0,05 µm. O volume total de mesoporos, e seu respectivo percentual em relação a porosidade total são respectivamente: ARG<sub>AN</sub> (0,034ml/g, 28,6%), ARG<sub>ARIAC</sub> (0,024ml/g, 28,7%) e ARG<sub>AR2AC</sub> (0,029ml/g, 23,5%). Observa-se que, as amostras das argamassas ARG<sub>ARIAC</sub> e ARG<sub>AN</sub> apresentam o mesmo percentual de mesoporos, enquanto a amostra da argamassa ARG<sub>AR2AC</sub> apresenta percentual um pouco menor. Os mesoporos não são responsáveis pela percolação de água no interior da argamassa, e sim, segundo Ho *et al* (2018), pela difusão gasosa e migração iônica.

A distribuição acumulada total do volume de poros (Figura 4.32 b), mostra que as amostras das argamassas ARG<sub>AN</sub>, ARG<sub>ARIAC</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> apresentam volume acumulado total, de 0,12ml/g, 0,084ml/g, e 0,125ml/g, respectivamente. O volume acumulado total, diz respeito a porosidade total da amostra, sendo assim, nota-se que as argamassas ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> apresentam a mesma porosidade total, 25%; enquanto que a argamassa ARG<sub>ARIAC</sub> apresenta 19% de porosidade total (Tabela 4.11).

Com base nas descrições e comparações apresentadas acima, alguns apontamentos serão colocados a seguir.

A análise detalhada das estruturas porosas (poros grandes, capilares e mesoporos), revelou que a amostra  $ARG_{AR1AC}$  mostra-se mais refinada, que as amostras das argamassas  $ARG_{AN}$  e  $ARG_{AR2AC}$  (Tabela 4.11). Sendo assim, é possível afirmar que a areia AR1 é capaz de refinar poros, tal afirmação pode ser entendida pelo fato da areia AR1 apresentar maior fator de empacotamento dos grãos em relação a areia AN e AR2 (Tabela 4.4).

Contudo, quando os parâmetros apresentados na Tabela 4.11 são analisados apenas em função dos macroporos totais e mesoporos, nota-se que as amostras  $ARG_{AN}$  e  $ARG_{AR1AC}$  apresentam percentuais de macroporos totais e mesoporos praticamente idênticos, enquanto que a amostra  $ARG_{AR2AC}$  se mostra menos semelhante às argamassas  $ARG_{AN}$  e  $ARG_{AR1AC}$  (Tabela 4.11). Sendo assim, os resultados do PIM corroboram com as análises do MEV (EDS), que mostraram que a amostra  $ARG_{AR1AC}$  apresenta configuração mais próxima da  $ARG_{AN}$  que a  $ARG_{AR2AC}$ .

Como discutido nas análises do MEV (item 4.3.1), atribui-se as semelhanças das microestruturas gerais (configurações e estruturas porosas) das argamassas  $ARG_{AN}$  e  $ARG_{AR1AC}$ , aos fatores de empacotamento dos grãos das areias AN e AR1, próximos contudo, mais elevados na areia AR1, e as semelhanças de algumas características de suas “frações finas”, como massa específica e massa unitária, teores de sílica, alumínio e ferro. Da mesma forma que as diferenças entre as microestruturas das amostras  $ARG_{AR1AC}$  e  $ARG_{AR2AC}$ , são atribuídas ao melhor arranjo entre as partículas da areia AR1 em relação a areia AR2 na condição areia composta, ao maior valor de massa unitária da areia AR1 em relação a areia AR2, além da maior presença de pasta de cimento e teores de finos nas “frações finas” da areia AR2, em relação a areia AR1.

Ressalta-se aqui, que a ideia de que os agregados reciclados, por serem mais porosos (HANSEN, 1985; GÓMEZ-SOBERÓN, 2003; POON, SHUI e LAM, 2004; EVANGELISTA *et al.*, 2015), levariam a maiores porosidades totais de argamassas recicladas (MARTÍNEZ *et al.*, 2013), ou a um maior número de poros permeáveis (EVANGELISTA e DE BRITO, 2010) não se confirma neste estudo, para a idade de 7

dias. Isso porque, apesar das areias AR1 e AR2 na condição areia composta apresentarem taxa de absorção de água quase 70% maior que a areia AN (ver Figura 4.2), a argamassa ARG<sub>AR2AC</sub> se mostrou similar à ARG<sub>AN</sub> em relação ao volume de poros total e a argamassa ARG<sub>AR1AC</sub> se mostrou mais refinada, e com menor porosidade total que a argamassa padrão (ARG<sub>AN</sub>). Acredita-se que tais resultados possam ser explicados em função das taxas de fator de empacotamento dos grãos. No caso da argamassa ARG<sub>AR1AC</sub>, a areia AR1 apresentou maior fator de empacotamento dos grãos que a areia de referência (AN), e no caso da argamassa ARG<sub>AR2AC</sub>, a areia AR2 apresentou fator de empacotamento bem próximo ao da areia AN (ver Tabela 4.4).

Outro aspecto que poderia explica as estruturas porosas das argamassas recicladas, se refere a taxas de absorção de água relativamente baixas das areias AR1 e AR2 (2,9%) (ver Figura 4.2), em relação às areias recicladas de outros estudos (ver Tabela 4.5) e da incorporação das areias recicladas à mistura, na condição seca. Juntas elas teriam minimizado os efeitos do aumento relação água/cimento real em volta dos grãos das areias recicladas e contribuído para a formação de uma estrutura porosa mais fechada na região da nova ZT (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013; MALTA *et al.*, 2014), refletindo positivamente na estrutura porosa geral das argamassas recicladas. Justificando assim, a similaridade das configurações das novas ZT das argamassas ARG<sub>AR1AC</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub> e destas em relação à ARG<sub>AN</sub>, observadas nas análises do MEV (Figuras 4.27, 4.29 e 4.31).

Contudo, observa-se que aos 7 dias, as argamassas ARG<sub>AN</sub>, ARG<sub>AR1AC</sub> e ARG<sub>AR2AC</sub>, obtiveram ganho de resistência mecânica à compressão de respectivamente: 26,92MPa, 22,66MPa e 15,36MPa (ver Figura 4.21). Tais resultados mostram que, apesar das amostras das argamassas ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>AR1AC</sub> apresentarem porcentagens de macroporos totais e mesoporos praticamente idênticos, e da ARG<sub>AR1AC</sub> se mostrar mais refinada e com menor volume total de poros que a ARG<sub>AN</sub>; a argamassa ARG<sub>AN</sub> apresenta maior valor de resistência à compressão que a argamassa ARG<sub>AR1AC</sub>. Isso significa que outras características, além da estrutura porosa, influenciaram no comportamento mecânico das argamassas ARG<sub>AR1AC</sub>. Acredita-se que a presença de pasta de cimento aderida \_ não identificada nas análise do MEV, mas presente, sobretudo nas “frações grossas” da areia AR1 \_ fez aumentar a relação água/cimento na região das ZT; fazendo com que a microestrutura destas argamassas se tornassem mais frágeis nestes pontos, afetando sua resistência à compressão.



Com relação a argamassa  $ARG_{AR2AC}$ , seu menor valor de resistência à compressão, corrobora com os resultados de PIM, que mostraram que a amostra  $ARG_{AR2AC}$  apresenta maior percentual de “poros grandes” e menor percentual de mesoporos. Estes resultados por sua vez contribuem com as análises do MEV (EDS) que mostraram que a presença da pasta de cimento e microfissuras poderiam indicar a influência negativa principalmente das “frações finas” na da areia AR2 na microestrutura da argamassa  $ARG_{AR2AC}$ .

É possível afirmar através das análises microestruturais, que as características das “frações finas” da areia AR2 influenciaram na formação microestrutural e no comportamento mecânico das argamassas  $ARG_{AR2AC}$ . Ao passo que, na argamassa  $ARG_{AR1AC}$ , características das “frações finas” e o fator de empacotamento dos grãos da areia AR1, ajudaram a compreender a sua formação microestrutural. Contudo, foram as características das “frações grossas”, que justificaram seu pior comportamento mecânico em relação à argamassa de referência ( $ARG_{AN}$ ).

Por fim, é preciso ressaltar que as análises foram realizadas em amostras ainda muito jovens, portanto, para que estas constatações pudessem ser melhor consolidadas, seria necessário analisar amostras de argamassas com idades mais avançadas.

#### **4.3.3 Considerações sobre a Parte 3 do Trabalho.**

Constatou-se que a configuração das novas zonas de transição das areias recicladas, são semelhantes à da argamassa padrão, e que a presença de “pontes” na região de interface (fase nova ZT e fase mineral) das três argamassas, representariam pontos de maior resistência nesta região mais frágil.

A argamassa  $ARG_{AR2AC}$  se mostrou similar à argamassa padrão ( $ARG_{AN}$ ) em relação ao volume de poros total e a argamassa  $ARG_{AR1AC}$  se mostrou mais refinada, e com menor porosidade total que a argamassa padrão ( $ARG_{AN}$ ), contrariando pesquisas da área. Os bons resultados das argamassas recicladas foram entendidos em função das taxas de fator de empacotamento dos grãos, das taxas de absorção de água relativamente baixas das areias recicladas e de suas incorporações à mistura na condição seca.

As imagens do MEV mostraram a presença da antiga pasta de cimento e de microfissuras nas argamassas ARG<sub>AR2AC</sub>, que poderiam ajudar a entender seu pior comportamento mecânico e sua estrutura porosa menos refinada, em relação às outras amostras.

Observou-se que a menor porosidade total e o maior refinamento da argamassa ARG<sub>AR1AC</sub>, pode ser entendido em função do maior fator de empacotamento dos grãos da areia AR1. Ao passo que uma análise da estrutura poros mais simples \_ baseada no volume de “macroporos total” e mesoporos \_ juntamente com as imagens do MEV, revelaram que as amostras ARG<sub>AN</sub> e a ARG<sub>AR1AC</sub> apresentam microestruturas gerais bastante similares.

Por fim, as análises do MEV (EDS) corroboram com os resultados das análises do PIM, por sua vez as análises microestruturais encontraram respaldo nas características mineralógicas, químicas e físicas das areias recicladas \_ não só na condição areia composta, como também nas “frações grossas” e nas “frações finas” \_ para justificar seus diferentes comportamentos mecânicos.

#### **4.4 PARTE 4: ESTUDO DA POZOLANICIDADE DAS FRAÇÕES PULVERULENTAS**

A última parte do trabalho tem como objetivo investigar pozolanicidade das frações pulverulentas FP1 e FP2. Inicialmente as frações pulverulentas foram caracterizadas. Na sequência suas potencialidades pozolânicas foram avaliadas, através do cálculo do Índice de Atividade Pozolânica (IAP). Por fim, por meio da aplicação da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), foi possível conhecer a estrutura porosa das argamassas recicladas que continham estes materiais.

##### **4.4.1 1º Etapa: Caracterização das frações pulverulentas FP1 e FP2**

As frações pulverulentas FP1 e FP2, foram submetidas aos ensaios físicos de massa unitária, absorção de água e massa específica (Tabela 4.12). Suas morfologias foram conhecidas através das imagens do MEV (Figura 4.33) e suas composições mineralógicas e químicas, conhecidas através das análises de DRX (Figura 4.34) e FRX (Tabela 4.13).

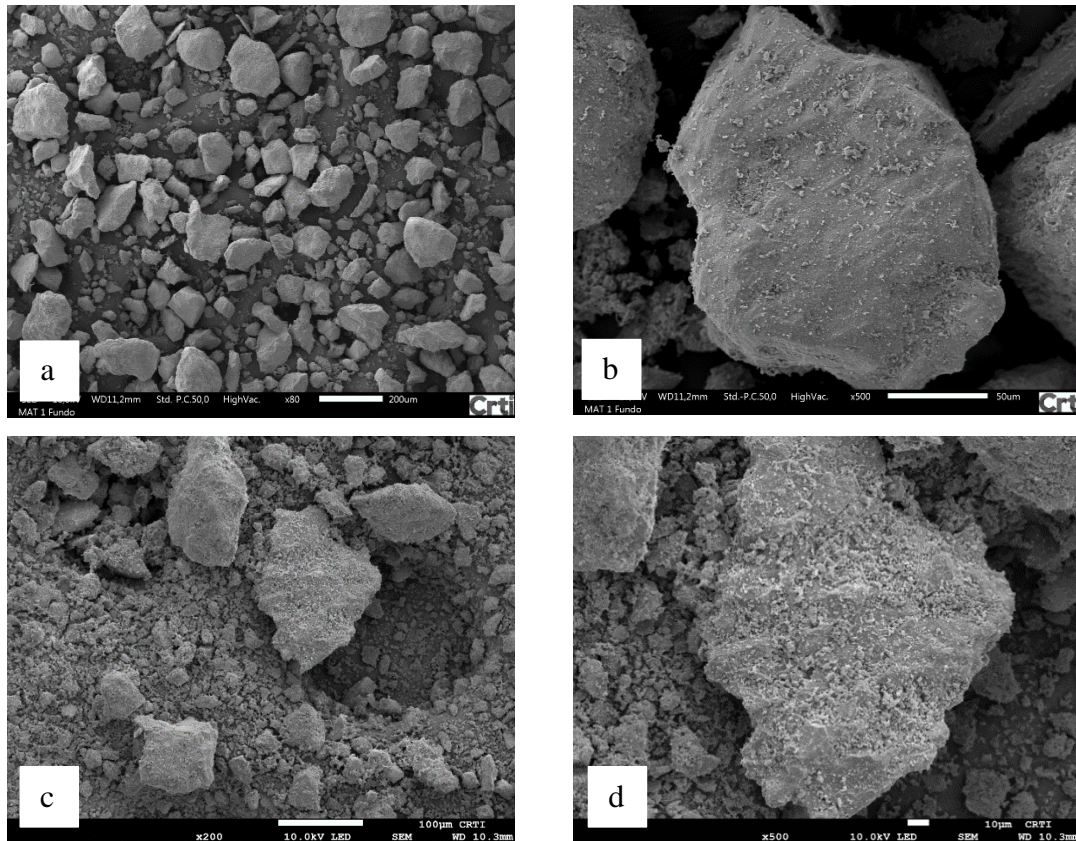
##### **A) Caracterização Física**

A Tabela 4.12 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física das frações FP1 e FP2. Observa-se, que a fração FP1 apresenta massa unitária 26% maior que a fração FP2 e taxa de absorção de água 78% menor que da fração FP2.

**Tabela 4.12: Caracterização física as frações pulverulentas: FP1 e FP2**

| <b>Características Físicas</b>             | <b>FP1</b> | <b>FP2</b> |
|--|------------|------------|
| Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )        | 1292,0     | 952,0      |
| Absorção de água (%)                       | 2,1        | 9,5        |
| Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,1        | 2,0        |

As imagens do MEV da Figura 4.33 a seguir, mostram que as frações FP1 e FP2 são aparentemente distintas, contudo, assim como nas características físicas, estas frações se assemelham a fração fina das areias correspondentes (Figuras 4.1, 4.2, 4.10 e 4.14).



**Figura 4.33 \_ Imagens do MEV de amostras das frações pulverulentas: (a) imagem geral da FP1 (X80), (b) superfície de um grão da FP1 (X500), (c) imagem geral da FP1 (X200), (d) superfície de um grão da FP2 (X500).**

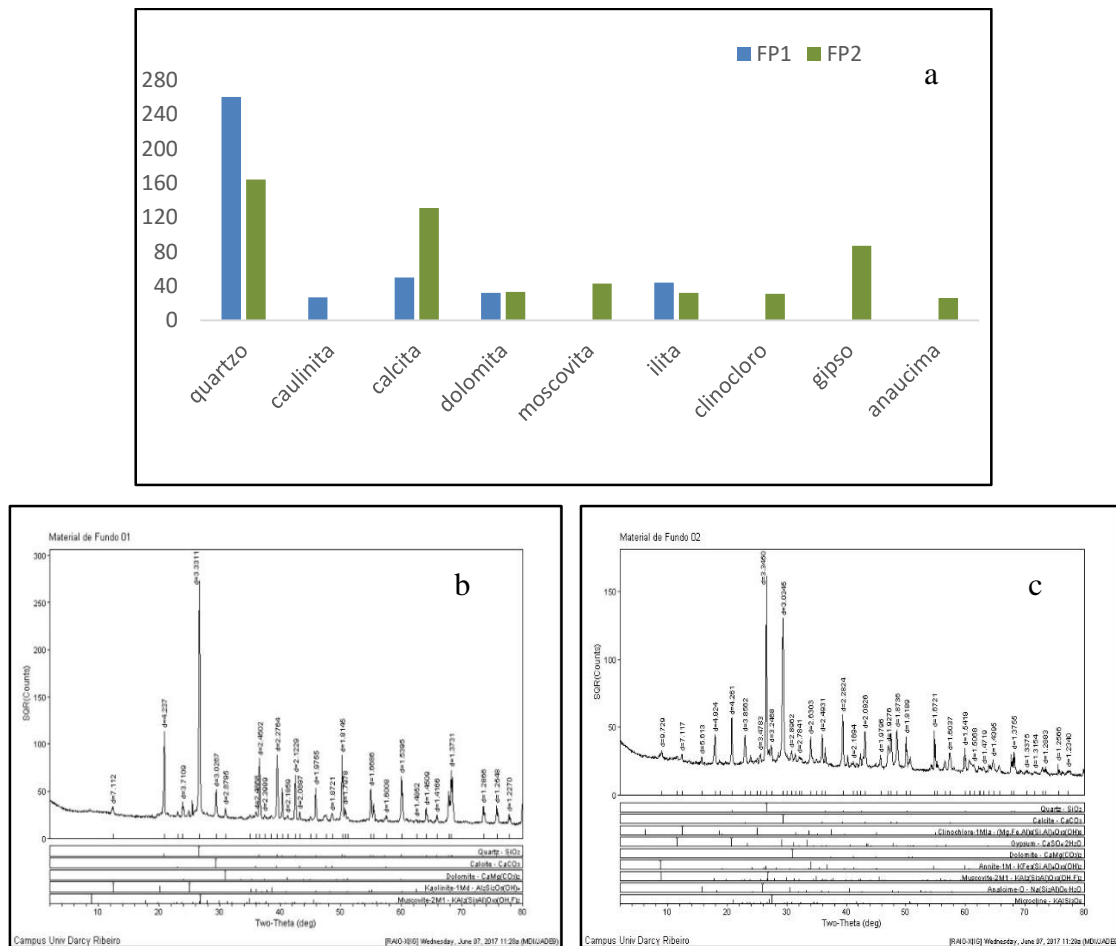
Em relação as formas, estas são bem variadas, tanto a fração FP1, quanto a fração FP2, e vão desde de grãos com alto grau de esfericidade, até grãos angulares (Figura 4.33 a, c). Assim como na fração fina da areia AR2, a fração FP2 apresenta fragmentos, que podem ser de pasta de cimento (Figura 4.33 c).

Em relação à textura, a fração FP2 apresenta-se mais rugosa que a fração FP1, observa-se que a superfície do grão da fração FP2 tem aspecto poroso, que segundo Poon, Shui e Lam (2004), são indícios de pasta de cimento (Figura 4.33d). As altas taxas de absorção de água da fração FP2 em relação a fração FP1 (Tabela 4.12), corroboram com as imagens do MEV, e reforçam a ideia de que boa parte da fração pulverulenta FP2 seria composta por pasta de cimento. Já a superfície do grão da fração FP1, aparenta ser menos porosa, contudo, assim como observado na fração fina da areia AR1, nota-se a presença de pequenos fragmentos aderidos à sua superfície, que podem ser de pasta de cimento (Figura 4.33 c).

Com base nas características físicas apresentadas acima, pode se dizer que assim como a fração fina da areia AR2, a fração pulverulenta FP2 se mostra, de forma geral, menos densa, com granulometria menos contínua, e com maiores indícios de presença de pasta de cimento que a fração fina da areia AR1 e a fração FP1. Uma hipótese seria que as características físicas da fração FP1 (Tabela 4.12), venham a contribuir positivamente no comportamento mecânico e na formação da estrutura porosa das argamassas confeccionadas com estas frações.

## B) Caracterização Mineralógica

Os resultados das análises mineralógicas das frações pulverulentas estão apresentados no gráfico de colunas e nos difratogramas da Figura 4.34.



**Figura 4.34 \_ Análise qualitativa das principais fases cristalinas das frações pulverulentas (fases cristalinas *versus* intensidade dos picos) (a); difratograma da fração pulverulenta FP1 (b); difratograma da fração pulverulenta FP2.**

As frações pulverulentas, assim como as areias recicladas, apresentam diversas fase cristalinas comuns à natureza deste tipo de material (Figura 4.34 a), em relação aos picos, estes são característicos dos materiais cristalinos (Figura 4.34 b, c). Os pesquisadores Cordeiro, Tavares e Toledo Filho (2016), constataram diminuição nos picos de cristalinos mais intensos após a moagem, devido a ruptura de estruturas cristalinas. Logo, seria interessante que os materiais pulverulentos estudados neste trabalho tivessem passado por análises mineralógicas também após as moagens, o que não foi possível devido à escassez de tempo.

Comparando as frações pulverulentas, nota-se que a fração FP1 apresenta cinco fases cristalinas e a fração FP2 oito fases cristalinas (4.34 a), e que assim como nas frações granulométricas das areias recicladas, a fase cristalina com pico mais intenso nas frações FP1 e FP2 é o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). A calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), que pode se referir tanto a pasta de cimento, quanto a rocha calcária, aparece como segunda fase cristalina com picos mais intensos. As diferenças das intensidades das fases cristalinas nas frações FP1 e FP2, podem ser explicadas a partir da constituição dos resíduos que geraram estes materiais. A FP2 foi gerada a partir de corpos de prova de concreto (RC), compostos por agregados de rochas ígneas, calcárias e pasta de cimento e os RCD que geraram a fração FP1, são oriundos de diversas fontes, não se observando, portanto, presença tão acentuada da fase mineral calcita, por exemplo.

O gipso ( $\text{CaSO}_4+2\text{H}_2\text{O}$ ), que costuma impactar negativamente na resistência e na durabilidade das argamassas, não foi detectado na fração FP1, porém, aparece como terceira fase cristalina mais presente na fração FP2. Em relação a fase cristalina caulinita, observa-se a presença desta fase na fração FP1 (Figura 4.34). Vale ressaltar que a calinita tem servido como matéria prima para a fabricação da pozolana metacaulin.

### C) Caracterização Química

Apresenta-se na Tabela 4.13, os óxidos presentes nas frações FP1 e FP2.

**Tabela 4.13: Resultado da análise química por FRX das frações pulverulentas FP1 e FP2.**

| Óxidos (%)                     | FP1 (%) | FP2 (%) |
|--------------------------------|---------|---------|
| SiO <sub>2</sub>               | 70,7    | 25,8    |
| CaO                            | 12,9    | 59,9    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10,0    | 5,0     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,4     | 3,5     |
| MgO                            | 0,9     | 1,8     |
| K <sub>2</sub> O               | 0,7     | 2,0     |
| SO <sub>3</sub>                | 0,5     | 1,4     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,4     | 0,3     |
| BaO                            | 0,2     | -       |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0,1     | -       |
| SrO                            | -       | 0,1     |
| MnO                            | -       | 0,1     |

Nota-se na Tabela 4.13, que as frações pulverulentas apresentam diferenças consideráveis também nas suas constituições químicas. Percebe-se que assim como nas frações granulométricas da areia reciclada AR1, na fração FP1 a sílica (SiO<sub>2</sub>) está presente em mais de 70% das amostras deste material. Enquanto isso, na fração FP2, o óxido de cálcio (CaO) faz parte de praticamente 60% da amostra, assim como nas frações granulométricas da areia AR2. Sendo assim, a superfície aparentemente porosa, a presença de gipso e a alta taxa de absorção de água observados na fração pulverulenta FP2, justificam pensar que boa parte do CaO presente neste material, se refira a pasta de cimento (Figura 4.33 c, d, Figura 4.34 e Tabelas 4.12 e 4.13).

Contudo, apesar das frações pulverulentas apresentarem composição química similar as frações da areia correspondente, nota-se uma queda dos teores de sílica e elevação nos teores de óxido de cálcio das “frações finas” das areias AR1 e AR2 para as frações pulverulentas FP1 e FP2 (Tabelas 4.7 e 4.13); algo similar foi constatado em Figueiredo e Ulsen (2017), para areias de RCD. Considerando que parte do óxido de cálcio se refira à pasta de cimento, é possível afirmar que, independente da origem ou do processo de beneficiamento pelo qual a areias recicladas AR1 e AR2 tenham passado, a pasta de cimento tende a se acumular-se nas frações pulverulentas.

Como visto na Tabela 4.13, a fração FP2 apresenta 59,9% de CaO, valor bem próximo ao do cimento Portland CII-F 32, utilizado nesta pesquisa, que é de 65,7% (Tabela 3.6). A presença de teores consideráveis de CaO em materiais pulverulentos, segundo Li *et al.* (2015) e Baldusco *et al.* (2017), tornaria possível seu uso em frações de substituições de cimento. Já para Ulsen *et al.* (2010), percentuais superiores a 50% de CaO e/ou de cerâmica vermelha/argila ( $Al_2O_3$ ), indicaria o uso em potencial do material como matéria-prima alternativa para a indústria do cimento.

Em relação a alumina, segundo Li *et al.* (2010) e Paris *et al.* (2016) os géis C-S-H, que vêm do  $C_2S$  e  $C_3S$ , têm uma relação C/S mais baixa e tendem a ter o benefício adicional de maior absorção de alumínio criando um gel C-A-S-H, além do C-S-H. O cimento CII-F-32, utilizado na pesquisa, apresenta 3,21% de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) (Tabela 3.6), enquanto que as frações FP1 e FP2 apresentam 10% e 5% respectivamente (Tabela 4.13).

Em relação a apresenta de sílica, nota-se que a fração FP1 apresenta 70,7% deste óxido (Tabela 4.13). Pesquisas mostram (TAYLOR, 1997; LI *et al.*, 2010; MEHTA e MONTEIRO, 2014); LI *et al.*, 2015), que em um cimento Portland puro, a conversão para C-S-H deixa uma abundância de produtos de cálcio, geralmente na forma de portlandita ( $Ca(OH)_2$ ). Sendo assim, a adição de materiais ricos em sílica, poderiam reagir com a portlandita para produzir mais gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) com menor relação cálcio/sílica (C/S).

As caracterizações mineralógicas apresentadas, mostraram que as frações pulverulentas FP1 e FP2 apresentam picos característicos de materiais cristalinos, ou seja, são pouco reativos. Por outro lado, as análises químicas mostraram que as frações pulverulentas apresentam percentuais de CaO e  $SiO_2$ , que indicaria o uso em potencial destes materiais como materiais cimentícios suplementares, como matéria prima alternativa para indústria de cimento ou como material de enchimento (fílers). Contudo, pesquisas como as de Cordeiro e Désir (2010), Cordeiro *et al.* (2011), Andreão e Cordeiro (2017) e Guillante *et al.* (2017), têm mostrado que a eficiência destes materiais alternativos, estão normalmente atrelados a tratamentos térmicos, e/ou em sinergia com outros materiais.



#### 4.4.2 2º Etapa: Ensaios para cumprimento dos requisitos para materiais pozolânicos

As frações FP1 e FP2 foram submetidas aos ensaios de requisitos químicos e físicos propostos pela ABNT NBR 12653:2015-Materiais pozolânicos-Requisitos. A Tabela 4.14, apresenta os resultados dos ensaios de requisitos químicos e a Tabela 4.15, apresenta os resultados do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) das frações pulverulentas para três finuras distintas.

##### A) Requisitos Químicos

Os resultados da análise de FRX, para as frações pulverulentas (Tabela 4.14), mostram que a fração FP1 obteve teor  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  acima do mínimo estipulado para pozolanas, já a fração FP2, apresentou um teor abaixo do mínimo estipulado para estes elementos.

**Tabela 4.14: Requisitos químicos segundo a ABNT NBR 12653:2015: FP1 e FP2.**

| Parâmetros Avaliativos (%)                                 | Classe do Material Pozolânico |            |            | Resultados    |       |
|--|-------------------------------|------------|------------|---------------|-------|
|  | N                             | C          | E          | FP1           | FP2   |
| $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\geq 70$                     | $\geq 70$  | $\geq 50$  | 84,11         | 34,36 |
| $\text{SO}_3$  | $\leq 4$                      | $\leq 5$   | $\leq 5$   | 0,53          | 1,41  |
| Teor de umidade  | $\leq 3$                      | $\leq 3$   | $\leq 3$   | 0,68          | 3,00  |
| Perda ao Fogo  | $\leq 10$                     | $\leq 6$   | $\leq 6$   | 5,49          | 22,95 |
| Alcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$               | $\leq 1,5$                    | $\leq 1,5$ | $\leq 1,5$ | Não detectado |       |

Em relação ao teor de sulfato ( $\text{SO}_3$ ) e o teor de umidade, estes ficaram dentro do mínimo estipulado, para as duas frações (Tabela 4.14). Com relação ao parâmetro de perda ao fogo (PF), este ficou abaixo do máximo permitido para a fração FP1, já a fração FP2 não cumpriu este requisito, apresentando PF de 23%, quando o máximo permitido para pozolanas classificadas como N (naturais ou artificiais) seria de 10% (Tabela 4.14). Não foi detectada a presença do óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) em nenhuma das amostras analisadas. Este elemento, quando em contato com a água, pode reagir formando o sal hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), nocivo aos materiais cimentícios (Tabela 4.14).

Sendo assim, em relação aos requisitos químicos, a fração FP1 foi classificada como pozolana Classe C, cinza volante. A fração FP2, não se classificou como pozolana, pois não cumpriu requisito mínimo quanto a presença  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  e PF.

## B) Requisitos Físicos

As frações FP1 e FP2, moídas nos tempos 4 min, 6 min e 8 min, se enquadraram na finura mínima exigida para material pozolânico, logo, a fim de investigar a influência das diferentes finuras em seus desempenhos, as frações moídas nestes tempos, além das frações sem moagem, foram encaminhadas para análises de granulometria a laser e superfície específica BET. Também foram realizados ensaios para determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) desses materiais. Os ensaios de IAP, seguiram em conformidade com a ABNT NBR 5752:2015- Materiais Pozolânicos-Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28. Para tal, foram confeccionados corpos de prova de argamassas padrão (ARG<sub>AN</sub>) e de argamassas recicladas, com substituição de 25% do cimento Portland CII-F-32 pela fração FP1 (ARG<sub>FP1 4min</sub>, ARG<sub>FP1 6min</sub> e ARG<sub>FP1 8min</sub>) e pela fração FP2 (ARG<sub>FP2 4min</sub>, ARG<sub>FP2 6min</sub> e ARG<sub>FP2 8min</sub>).

No Apêndice E deste documento, se encontram os relatórios dos ensaios de superfície específica BET e de granulometria a laser \_ com as curvas granulométricas das frações FP1 e FP2 \_ nos tempos de moagem de 0 min, 4min, 6min e 8 min.

A Tabela 4.15, apresenta os resultados dos diâmetros e das superfícies específicas das frações pulverulentas; assim como os resultados dos IAPs das argamassas nos diferentes tempos de moagem.

**Tabela 4.15: Diâmetros e superfície específica das frações FP1 e FP2 e Índice de Atividade Pozolânica (IAP) das argamassas ARGFP1 e ARGFP2.**

| Tempo de moagem (min) | FP1                 |                      |                      |                      |                         | ARG <sub>FP1</sub> |
|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|
|                       | D <sub>m</sub> (µm) | D <sub>10</sub> (µm) | D <sub>50</sub> (µm) | D <sub>90</sub> (µm) | BET(cm <sup>2</sup> /g) | IAP (%)            |
| 0                     | 104,25              | 25,41                | 105,19               | 177,72               | -                       | 15,4               |
| 4                     | 16,17               | 1,17                 | 10,81                | 39,53                | 6.023                   | 60,7               |
| 6                     | 14,20               | 1,03                 | 8,99                 | 35,54                | 6.574                   | 62,5               |
| 8                     | 11,49               | 0,9                  | 5,68                 | 33,12                | 6.213                   | 67,0               |
| Tempo de moagem (min) | FP2                 |                      |                      |                      |                         | ARG <sub>FP2</sub> |
|                       | D <sub>m</sub> (µm) | D <sub>10</sub> (µm) | D <sub>50</sub> (µm) | D <sub>90</sub> (µm) | BET(cm <sup>2</sup> /g) | IAP (%)            |
| 0                     | 42,75               | 3,04                 | 30,36                | 102,02               | -                       | 13,5               |
| 4                     | 17,79               | 1,04                 | 9,70                 | 47,42                | 10.312                  | 73,9               |
| 6                     | 15,27               | 0,89                 | 8,00                 | 40,70                | 10.499                  | 68,1               |
| 8                     | 14,23               | 0,87                 | 7,59                 | 38,36                | 10.651                  | 66,3               |

Nota-se na Tabela 4.15, que a substituição das frações pulverulentas sem moagem, resultaram em argamassas com baixíssimos IAP e, apesar da fração FP2 apresentar respectivamente  $D_{50}$  e  $D_m$ , 70% e 59%, menores que a fração FP1, os dois materiais apresentaram finuras superiores àquelas consideradas pela literatura como ideais para materiais cimentícios suplementares (dentre os quais se encontram as pozolanas). Para Somna *et al.* (2012), os materiais cimentícios suplementares deveriam ter finuras iguais ou inferiores às dos cimentos Portland e para John, Cincotto e Gomes da Silva (2003), a finura ideal para pozolanas seria abaixo de  $15\mu\text{m}$ . O cimento do cimento Portland CII-F-32 utilizado na pesquisa, apresenta  $D_{50} = 17,07\ \mu\text{m}$  e  $D_m = 18,70\ \mu\text{m}$  (ver Tabela 3.6).

Após as moagens (Tabela 4.15), as frações pulverulentas alcançaram finuras inferiores às do cimento Portland CII-F-32 utilizado na pesquisa (Tabela 3.6). Por outro lado, nem todos as frações pulverulentas alcançaram finura abaixo de  $15\mu\text{m}$ , considerada ideal por John, Cincotto e Gomes da Silva (2003) (Tabela 4.15).

Observa-se que a diminuição do tamanho médio de partícula ( $D_{50}$ ) é acompanhada pela diminuição dos valores de  $D_{10}$  e  $D_{90}$ , indicando que a distribuição granulométrica das frações ficou mais estreita, com as reduções granulométricas (Tabela 4.15).

Em relação a área superficial das frações pulverulentas, de acordo com John, Cincotto e Gomes da Silva (2003), elas devem ser maiores que  $3.000\ \text{cm}^2/\text{g}$ , no caso os materiais moídos alcançaram valores de superfície específica bem maiores que  $3.000\ \text{cm}^2/\text{g}$ , sendo que a fração FP2 apresenta área superficial 40% maior que as frações FP1 (Tabela 4.15).

Logo, após as moagens as frações pulverulentas passaram a apresentar as condições mínimas de finura e superfície específica consideradas pela literatura como ideais para os materiais cimentícios suplementares. Tal fato refletiu em aumentos consideráveis nos IAP das argamassas ARG<sub>FP1</sub> e ARG<sub>FP2</sub>, que passaram a apresentar IAP médios de 63 % 69%, respectivamente. Estes resultados mostram que a finura e a área superficial exercem influência positiva nos desempenhos das argamassas recicladas.

Nota-se que as argamassas ARG<sub>FP2</sub> apresentaram IAP médio um pouco maior as argamassas ARG<sub>FP1</sub> (Tabela 4.15). Tais resultados podem ser explicados em função dos maiores valores de área superficial da fração FP2 em relação à fração FP1. Outro aspecto,

que talvez tenha influenciado, se refere a maior presença de pasta de cimento, contendo compostos de cimento hidratados ou não, na fração FP2 (Tabela 4.12, Figura 4.33). A presença de compostos não hidratados pode ter elevado o conteúdo de cimento presente nas misturas com a fração FP2 em relação às misturas com a fração FP1.

Não se pode afirmar porém, que os IAP continuaram aumentando com a diminuição das finuras das frações, até porque, as diferenças entre os diâmetros ( $D_m$  e  $D_{50}$ ) para as moagens em 4min, 6min e 8min foram de no máximo  $4\mu\text{m}$ . Logo, acredita-se que houve baixa eficiência de moagem para tempos maiores que 4min. A baixa eficiência das moagens para tempos maiores que 4min (Tabela 4.15), podem ser explicadas através de observações rotineiras de laboratório, que têm mostrado que materiais com presença de carbonatos e argilas em sua composição, quando submetidos a elevados tempos de moagem, tendem a apresentar comportamentos plásticos, fazendo com que a eficiência da moagem caia. Constatou-se tal comportamento durante a moagem das frações FP1 e FP2, pois quando as mesmas foram submetidas a maiores tempos de moagem, estas passavam a aderir às paredes das panelas do moinho, apresentando assim um comportamento plástico.

Apesar das argamassas com incorporação das frações moídas apresentarem melhoras dos IAP, as mesmas ficaram abaixo do mínimo recomendado pela ABNT NBR 12653:2015- Materiais pozolânicos-Requisitos, que é de 90% de desempenho. Isso significa que as frações pulverulentas FP1 e FP2 não são consideradas pozolanas. Os resultados desta etapa, apenas confirmam os resultados das análises mineralógicas (Figura 4.34), que mostraram que as frações FP1 e FP2 apresentavam picos característicos de materiais cristalinos, portanto pouco reativo.

Assim como neste trabalho, Galletto *et al.* (2017), obteve apenas 69% de IAP, com substituição de 25% do cimento por pulverulentos de resíduos de RCDs. Por outro lado, estudos têm mostrado melhores resultados para menores teores de substituição. Braga, De Brito e Veiga (2012), por exemplo, observaram melhoras no comportamento mecânico de argamassas com substituições de 5%, 10% e 15% de cimento por pulverulentos de RC. Já Elaqla (2015), observou melhoras nas resistências à compressão de argamassas com substituição de até 20% de cimento por pulverulentos de RCD, variando a relação a/c.

Por fim, os resultados apresentados na Tabela 4.15, não mostram influência direta das características físicas das frações FP1 e FP2, apresentadas na Tabela 4.12, nos IAP das argamassas recicladas. Logo, a hipótese levantada de que as argamassas recicladas com substituição da fração FP1 apresentariam melhor comportamento mecânico não se confirma para a substituição de 25%. Por outro lado, as características físicas de finura e área superficial mostram-se influentes nos índices de atividade pozolânicas das argamassas recicladas (Tabela 4.15).

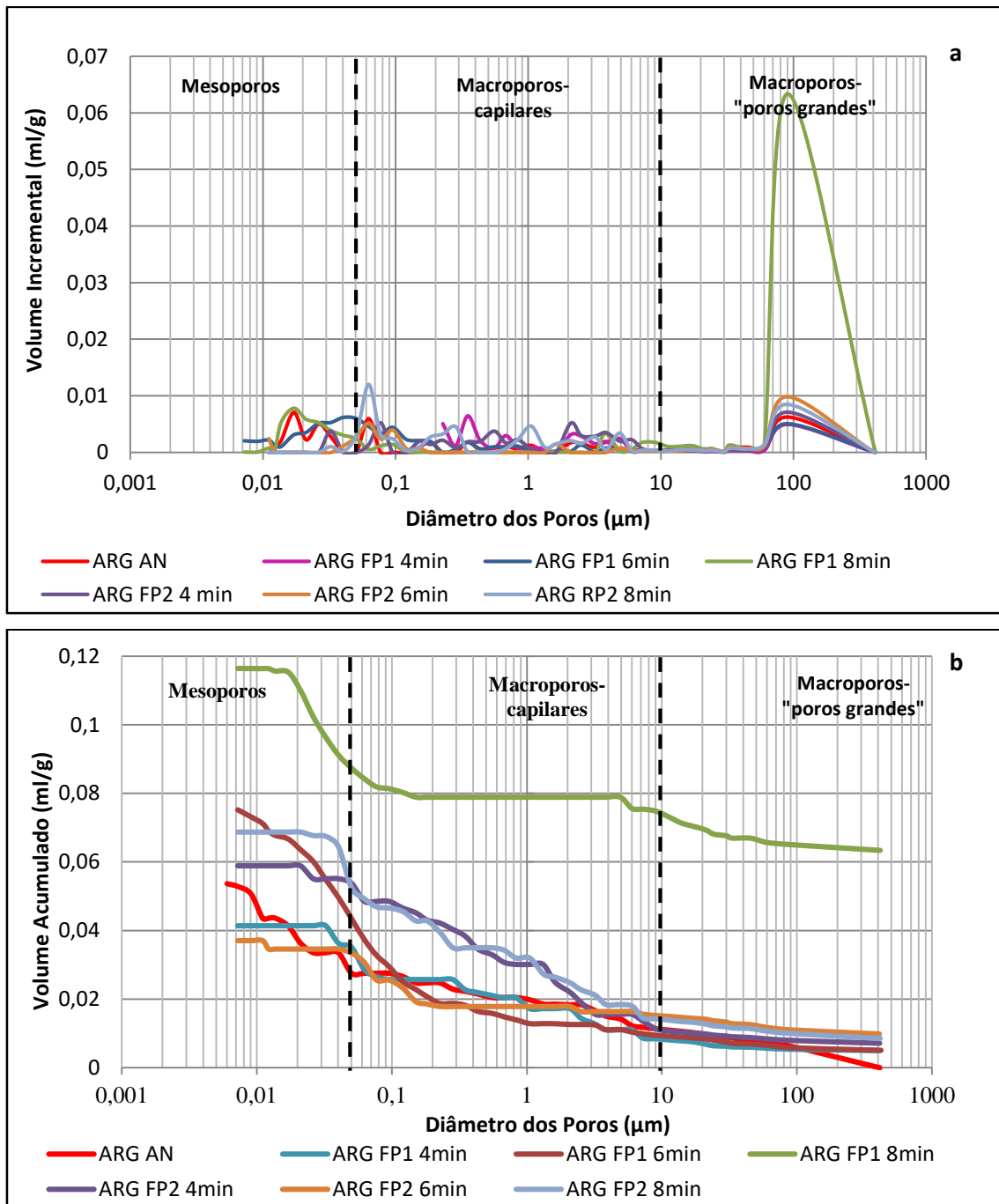
#### **4.4.3 3º Etapa: Caracterização da estrutura porosa das Argamassas Recicladas**

Amostras das argamassas: ARG<sub>AN</sub>, ARG<sub>FP1 4min</sub>, ARG<sub>FP1 6min</sub>, ARG<sub>FP1 8min</sub>, ARG<sub>FP2 4min</sub>, ARG<sub>FP2 6min</sub> e ARG<sub>FP2 8min</sub>, com idade de 28 dias, foram submetidas à paralisação do processo de hidratação do cimento para realização de análises por porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).

A seguir traça-se comparações entre estas amostras, tomando como base as informações apresentadas na Figura 4.35 e nas Tabelas 4.16 e 4.17. Sendo que a Figura 4.35, apresenta os resultados da distribuição incremental e acumulada do volume de poros e as Tabelas 4.16 e 4.17 apresentam os parâmetros de caracterização dos poros com as porcentagens das faixas dos poros em função do volume de mercúrio intrudido.

Foram analisadas as seguintes faixas de tamanhos de poros: os macroporos (>0,05µm), sendo que estes foram divididos em: macroporos “poros grandes” (maiores que 10µm) e macroporos capilares (0,05µm a 10µm) e os mesoporos (0,002µm a 0,05µm).

Analisando a faixa de macroporos “poros grandes” (Figura 4.35 a), a distribuição incremental mostra que os maiores picos estão nesta faixa de poros, com diâmetros que variam de 60 µm a 400 µm, com picos máximos em torno de 90µm (diâmetro dos poros), para todas as argamassas. O maior pico é o da amostra da argamassa ARG<sub>FP1 8min</sub>, com volume em torno de 0,07ml/g (Figura 4.35 a e b). As demais amostras apresentam picos com volumes que variam de 0,008 ml/g a 0,015ml/g (Figura 4.35 b).



**Figura 4.35 \_ Resultados do PIM para amostras das argamassas padrão e recicladas: (a) distribuição incremental de volume de poros, (b) distribuição acumulada do volume de poros.**

Observa-se na Tabela 4.16 a seguir, que nas amostras das argamassas com incorporação da fração FP1, houve diminuição na porcentagem de “poros grandes” com o aumento da finura das frações.

**Tabela 4.16: Parâmetros de caracterização dos poros das amostras ARG<sub>FP1</sub>.**

| <b>Parâmetros de caracterização</b>   | <b>ARG<sub>AN</sub></b> | <b>ARG<sub>FP1 4min</sub></b> | <b>ARG<sub>FP1 6min</sub></b> | <b>ARG<sub>FP1 8min</sub></b> |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Diâmetro médio (µm)                   | 0,012                   | 0,098                         | 0,032                         | 0,077                         |
| Volume total dos poros (ml/g)         | 0,054                   | 0,041                         | 0,075                         | 0,116                         |
| Porosidade Total (%)                  | 12,4                    | 9,7                           | 17,0                          | 24,9                          |
| Volume de macroporos “poros grandes”  | 0,011                   | 0,008                         | 0,009                         | 0,071                         |
| Macroporos “poros grandes” (%)        | 19,9                    | 18,9                          | 17,0                          | 11,2                          |
| Volume de macroporos capilares (ml/g) | 0,017                   | 0,021                         | 0,006                         | 0,013                         |
| Macroporos-capilares (%)              | 31,1                    | 50,3                          | 11,2                          | 2,0                           |
| Volume de macroporos total (ml/g)     | 0,028                   | 0,029                         | 0,015                         | 0,084                         |
| Macroporos total (%)                  | 51,0                    | 69,2                          | 28,2                          | 13,2                          |
| Volume de mesoporos (ml/g)            | 0,026                   | 0,013                         | 0,038                         | 0,552                         |
| Mesoporos (%)                         | 49,0                    | 30,8                          | 71,8                          | 81,8                          |

Na Tabela 4.17, observa-se que dentre as amostras das argamassas com as frações FP2, apenas a amostra ARG<sub>FP2 6min</sub>, apresenta percentual de “poros grandes” (43,3%), maior do que amostra padrão (19,9%). Apesar disso, não se observa nestas amostras uma tendência de diminuição dos “poros grandes”, com a diminuição da finura, como observado nas amostras das argamassas ARG<sub>FP1</sub>. (Tabela 4.16).

**Tabela 4.17: Parâmetros de caracterização dos poros das amostras ARG<sub>FP2</sub>.**

| <b>Parâmetros de caracterização</b>   | <b>ARG<sub>AN</sub></b> | <b>ARG<sub>FP2 4min</sub></b> | <b>ARG<sub>FP2 6min</sub></b> | <b>ARG<sub>FP2 8min</sub></b> |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Diâmetro médio (µm)                   | 0,012                   | 0,039                         | 0,074                         | 0,097                         |
| Volume total dos poros (ml/g)         | 0,054                   | 0,059                         | 0,037                         | 0,069                         |
| Porosidade Total (%)                  | 12,4                    | 13,2                          | 8,3                           | 15,4                          |
| Volume de macroporos “poros grandes”  | 0,011                   | 0,010                         | 0,015                         | 0,013                         |
| Macroporos “poros grandes” (%)        | 19,9                    | 17,6                          | 39,6                          | 19,5                          |
| Volume de macroporos capilares (ml/g) | 0,017                   | 0,038                         | 0,016                         | 0,036                         |
| Macroporos capilares (%)              | 31,1                    | 64,8                          | 43,3                          | 52,2                          |
| Volume de macroporos (ml/g)           | 0,028                   | 0,048                         | 0,031                         | 0,049                         |
| Macroporos total (%)                  | 51,0                    | 82,4                          | 82,9                          | 71,7                          |
| Volume de mesoporos (ml/g)            | 0,026                   | 0,010                         | 0,006                         | 0,019                         |
| Mesoporos (%)                         | 49,0                    | 17,6                          | 17,1                          | 28,3                          |

Observa-se que apesar da amostra ARG<sub>FP1 8min</sub> apresentar apenas 11,2% de “poros grandes”, esta apresenta volume intrudido em média seis vezes maior que o das outras amostras (Figura 4.35 a). Isso significa, que a amostra ARG<sub>FP1 8min</sub> tem cerca de seis vezes mais quantidade de poros grandes que as demais amostras. Talvez um erro durante a confecção ou moldagem do pequeno corpo de prova, possa ter levado a maior porosidade total desta amostra (25%) em relação às demais, que apresentaram porosidade total próximas, e até mesmo menores que a amostra da argamassa padrão (Tabelas: 4.16 e 4.17).

Em relação a faixa de macroporos capilares (Figura 4.15 a), vê-se inúmeros picos tortuosos, cobrindo toda faixa capilar, sendo que esta faixa de poros das amostras ARG<sub>FP1</sub> e ARG<sub>FP2</sub>, se comportam como as dos “poros grandes” (Tabelas: 4.15 e 4.16).

Analisa-se a seguir os macroporos total (poros capilares + poros grandes), das amostras ARG<sub>FP1</sub> e ARG<sub>FP2</sub> (Tabela 4.16 e 4.17).

Em relação as amostras ARG<sub>FP1 4min</sub>, ARG<sub>FP1 6min</sub> e ARG<sub>FP1 8min</sub>, as mesmas apresentam macroporos total de 69,2%, 28,2% e 13,2% respectivamente. Sendo que as amostras ARG<sub>FP1 6min</sub> e ARG<sub>FP1 8min</sub> apresentam menor percentual destes poros que a argamassa padrão (51%) (Tabela 4.15). Sendo assim, é possível afirmar que a fração FP1, quando incorporada em argamassas em finuras que variam em torno 11µm a 14µm, são capazes de refinar poros de argamassas (Tabela 4.16).

Já as amostras das argamassas ARG<sub>FP2</sub>, apresentam percentual de macroporos total maiores que os das argamassas ARG<sub>AN</sub> e ARG<sub>FP1</sub> (Tabela 4.15 e 4.16), apesar destas amostras apresentarem uma pequena diminuição dos macroporos total com a finura do material (82,4%, 82,9%, 71,7%) (Tabela 4.17).

Analisando a faixa de mesoporos das argamassas (Figura 4.35 a), observa-se inúmeros picos tortuosos, cobrindo a faixa de dimensão que vai de 0,06 µm a 0,005 µm. A distribuição acumulada do volume de poros (Figura 4.35 b), mostra que a amostra ARG<sub>FP18min</sub> chega a acumular volume de mercúrio em torno de 0,11ml/g, enquanto que as demais amostras apresentam acúmulo final de volumes de mercúrio que variam de 0,035ml/g à 0,075ml/g. Com isso, observa-se a curva da argamassa ARG<sub>FP18min</sub> se afasta ainda mais das demais curvas nesta faixa de poros (Figura 4.35 b).

As amostras ARG<sub>FP1 4min</sub>, ARG<sub>FP1 6min</sub> e ARG<sub>FP1 8min</sub> apresentam mesoporos nas proporções de 30,8%, 71,8% e 81,8% respectivamente, ou seja, observa-se o aumento desta faixa de poros com o aumento da finura das frações FP1 incorporadas nas argamassas (Tabela 4.15), sendo que, as amostras ARG<sub>FP1 6min</sub> e ARG<sub>FP1 8min</sub>, apresentaram maior percentual de mesoporos que amostra de argamassa padrão (49%). Já as amostras com a fração FP2 apresentaram baixo percentual de mesoporos, chegando ao percentual máximo de 28,3% na argamassa ARG<sub>FP2 8min</sub> (Tabela 4.17). Logo, o



aumento do percentual de mesoporos nas  $ARG_{FP1\ 6min}$  e  $ARG_{FP1\ 8min}$  confirmam a afirmação colocada acima, de que a fração FP1, quando incorporada em argamassas com finuras que variam em torno 11 $\mu$ m a 14 $\mu$ m, são capazes de refinar poros de argamassas (Tabela 4.16). Já a fração FP2, não mostrou ter esta capacidade.

Uma explicação para as diferenças das estruturas porosas das amostras  $ARG_{FP1}$  e  $ARG_{FP2}$ , talvez esteja nas características físicas das frações FP1 e FP2, que mostram que a fração FP1 apresenta maior massa unitária e taxa de absorção de água 78% menor que a fração FP2 (Tabela 4.12). Sendo assim, a hipótese levantada de que as características físicas da fração FP1 contribuiriam positivamente na formação da estrutura porosa, parece se confirmar.

Fazendo uma comparação entre os índices de atividade pozolânica (IAP) aos 28 dias das argamassas recicladas e suas estruturas porosas, observa-se que as argamassas  $ARG_{FP1\ 4min}$ ,  $ARG_{FP1\ 6min}$  e  $ARG_{FP1\ 8min}$ , obtiveram IAP crescentes com a finura do material. Logo, há coerência entre os comportamentos mecânicos destas argamassas e as estruturas porosas das amostras  $ARG_{FP1}$  correspondentes (Tabela 4.15), o que não foi constado nas argamassas  $ARG_{FP2}$ .

Nota-se porém, que a argamassa  $ARG_{FP2\ 4min}$ , cuja a estrutura porosa apresenta cerca de 80% de macroporos, apresentou índice de atividade pozolânica de 73,9%, o maior IAP entre todas as argamassas, enquanto que a argamassa  $ARG_{FP1\ 8min}$ , com mais de 80% de mesoporos, apresentou IAP menor, 67% (Tabela 4.15). As explicações para estes resultados talvez estejam na porosidade total destas argamassas –  $ARG_{FP1\ 8min}$  (25%) e  $ARG_{FP2\ 4min}$  (13,2%) (Tabelas 4.16 e 4.17) e na maior superfície específica da argamassa  $ARG_{FP2\ 4min}$  (10.312 cm<sup>2</sup>/g) em relação a argamassa  $ARG_{FP1}$  (6.213 cm<sup>2</sup>/g) (Tabela 4.15).

#### 4.4.4 Considerações sobre a Parte 4 do Trabalho

As imagens do MEV, os ensaios de caracterização física (massa unitária e absorção de água) e as análises químicas e mineralógicas mostram que as frações FP1 e FP2 são distintas e se assemelham a fração fina da areia correspondente.

Por outro lado, constatou-se aumentos nos teores de óxido de cálcio nas frações FP1 e FP2, considerando que parte do óxido de cálcio se refira à pasta de cimento, é possível afirmar que, independente da origem ou do processo de beneficiamento pelo qual as areias recicladas AR1 e AR2 tenham passado, a pasta de cimento tende a se acumular em suas frações pulverulentas.

Constatou-se que, mesmo as frações pulverulentas apresentando alguns óxidos considerados pela literatura como potenciais, para seus usos como materiais cimentícios suplementares, elas apresentam picos característicos de materiais cristalinos, sendo, portanto, pouco reativas.

A baixa reatividade das frações FP1 e FP2 pôde ser confirmada através dos ensaios de IAP, que mostraram que as frações pulverulentas estudadas não são pozolanas. Por outro lado, foi possível observar as características físicas de finura e superfície específica influenciando positivamente no comportamento mecânico das argamassas recicladas.

A caracterização da estrutura porosa das argamassas recicladas, mostraram a fração FP1 é capaz de refinar poros, sobretudo quando apresenta finuras entre  $11\mu\text{m}$  e  $14\mu\text{m}$ . Contudo as argamassas ARG<sub>FP2</sub> apresentaram IAP superiores às argamassas ARG<sub>FP1</sub>, apesar da estrutura porosa das argamassas ARG<sub>FP1</sub> apresentarem-se mais refinadas que as argamassas ARG<sub>FP2</sub>. Sendo assim, a característica de superfície específica e a presença de maiores conteúdos de cimento parecem ter influenciado mais no comportamento mecânico das argamassas recicladas ARG<sub>FP2</sub>, que suas estruturas porosas. Já as características físicas de massa unitária e absorção de água da areia AR1 ajudaram a explicar a capacidade de refinar poros da argamassa ARG<sub>FP1</sub>.

## 5 CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as principais conclusões deste trabalho. Vale ressaltar, porém, que estas conclusões são válidas apenas para as amostragens coletadas e analisadas nesta pesquisa.

Com base na análise dos resultados pode-se dizer que esta pesquisa obteve êxito ao caracterizar física, química e microestruturalmente as frações granulométricas das areias recicladas separadamente, pois o estudo revelou que as areias recicladas AR1 e AR2 são compostas por dois grupos; o grupo das “frações grossas” e o grupo das “frações finas”, com comportamentos e características com tendências distintas. Tal fato pode ser considerado como um avanço quanto as possibilidades de aplicação de frações específicas de areias recicladas em argamassas e concretos.

Constatou-se indiretamente, através da presença de sílica, alumina e ferro, que as “frações finas” da areia AR1 apresentam menor presença de pasta de cimento, em relação às suas “frações grossas”; se assemelhando às “frações finas” da areia de referência AN. Já na areia AR2, constatou-se indiretamente o aumento da presença de pasta de cimento nas “frações finas”, através do teor crescente de gesso, com a diminuição da granulometria da areia.

Os resultados de caracterização física na condição areia composta, mostraram que a areia AR1 é mais densa e apresenta granulometria mais contínua que a areia AR2, uma vez que essa apresenta massa unitária e fator de empacotamento dos grãos 8% e 11% maiores que a areia AR2, respectivamente.

Através da avaliação de diferentes frações e proporções de substituições, constatou-se que as argamassas com 100% de areia reciclada apresentaram comportamentos físico-mecânicos inferiores às aquelas com 25% de areia reciclada atribuído obviamente à porcentagem de substituição, impulsionados pelas características físicas e químicas das frações grossas da areia AR1 e das frações finas da areia AR2.

As argamassas recicladas com 25% ou 100% de substituição, obtiveram resultados de resistência à tração semelhantes às argamassas padrão, influenciados pela forma e textura dos grãos das areias recicladas AR1 e AR2.

O estudo das propriedades físico-mecânicas mostrou, que independentemente de serem produzidas a partir de areias de RCD ou RC, argamassas com teor de substituição de 25% de areia reciclada AR1 ou AR2, seja substituindo as “frações finas”, seja na condição “areia composta”, não causam alterações físico-mecânicas às argamassas, pois se comportam de forma similar as argamassas de referência.

A investigação da configuração microestrutural e da estrutura porosa das argamassas com 100% de areia reciclada e os resultados dos ensaios físico-mecânicos mostraram que as argamassas ARG<sub>AR1AC</sub> são superiores as ARG<sub>AR2AC</sub> e semelhantes as argamassas padrão ARG<sub>AN</sub>. Justificados em função do maior fator de empacotamento dos grãos da areia AR1 e da semelhança de suas “frações finas” com a areia AN.

Constatou-se que a configuração das novas zonas de transição das areias recicladas, são semelhantes à da argamassa padrão, e que a presença de “pontes” na região de interface (fase nova ZT e fase mineral) das três argamassas, representariam pontos de maior resistência nesta região mais frágil.

As imagens do MEV (EDS) mostraram a presença da antiga pasta de cimento aderida à superfície de um grão de areia AR2, cuja interface antiga ZT/mineral, ao contrário do que se afirma na literatura, se mostrou mais consolidada que a interface nova ZT/agregado.

A argamassa ARG<sub>AR2AC</sub> se mostrou similar à argamassa padrão (ARG<sub>AN</sub>) em relação ao volume total de poros e a argamassa ARG<sub>AR1AC</sub> se mostrou mais refinada, e com menor porosidade total que a argamassa padrão (ARG<sub>AN</sub>), contrariando pesquisas da área. Os bons resultados foram entendidos em função das taxas de fator de empacotamento dos grãos, das taxas de absorção de água relativamente baixas das areias recicladas e de suas incorporações às misturas na condição seca.

A investigação sobre a pozolanicidade das frações pulverulentas dos agregados miúdos reciclados mostrou que as frações pulverulentas FP1 e FP2 não foram classificadas como

pozolanas. Por outro lado, foi possível constatar melhoras de mais de 70% nos IAP das argamassas recicladas, quando as frações pulverulentas eram incorporados às misturas com finuras e superfície específica adequadas.

Concluiu-se que a areia AR1 e sua fração pulverulenta FP1 (quando incorporada em argamassas com finuras que variam entre 11 $\mu$ m e 14 $\mu$ m), foram capazes de refinar os poros das argamassas ARG<sub>AR1AC</sub> e ARG<sub>FP1</sub>. Justificado em função das características físicas de massa unitária e fator de empacotamento dos grãos da areia AR1.

O estudo concluiu que a presença de pasta de cimento vai variar dependendo da fração granulométrica analisada e de maneira diferente, dependendo da origem da areia reciclada, tendendo a se acumular em suas frações pulverulentas. A diversidade dos materiais de origem da areia AR1, fez com que a pasta de cimento e os contaminantes se diluíssem em suas frações, ao contrário, na areia AR2, eles se concentram, principalmente nas “frações finas”. Sendo assim, as “frações finas” da areia AR1 se mostraram superiores às “frações finas” da areia AR2. Acredita-se ser importante a remoção da pasta de cimento das “frações finas” das areias de corpo de prova de concreto, caso contrário, melhor utilizar as areias de usinas.

Por fim, a investigação da influência das frações granulométricas de dois agregados miúdos de RCD e de RC no comportamento físico-mecânico de argamassas recicladas; mostraram que há diferenças nos comportamentos das argamassas recicladas, conforme a fração granulométrica é substituída. Neste sentido o estudo obteve êxito, pois amplia as possibilidades de aplicação de agregados miúdos reciclados em *designs* de misturas de concreto e argamassas, uma vez que enquadrar areias recicladas à curva granulométrica padrão ainda é um desafio da área.

## 5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Com base nas considerações e conclusões apresentadas ao longo do texto do item anterior, percebe-se a necessidade de dar continuidade aos estudos, a fim de elucidar os tópicos listados a seguir.

- Incorporação das areias recicladas na proporção de 50% das misturas, testando a incorporação das “frações grossas” e das “frações finas” das areias AR1 e AR2, afim de constatar se as argamassas com substituição destes grupos de frações apresentam comportamentos físico-mecânicos compatíveis às suas características.
- Estudo dos efeitos da incorporação de areias recicladas com diferentes teores de sulfato na resistência e na degradação de argamassas, afim de constatar sua influência sobre a durabilidade destes materiais.
- Estudo da microestrutura das argamassas com 100% de areia reciclada nas idades de 28 dias e 91 dias, com análise do MEV (EDS), com foco na região de interface, com o intuito de acompanhar o aumento da presença das “pontes” nesta região além de análises via PIM.
- Estudo de incorporação das frações pulverulentas em argamassas recicladas em menores proporções, como também em conjunto com outros materiais, com potencialidade para atuarem como materiais cimentícios suplementares. Analisando a microestrutura das argamassas através do PIM e MEV (EDS) em diferentes idades.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: areia normal para ensaio de cimento: especificação e foi utilizada como referência na pesquisa. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: cimento portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001a.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001b.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001c.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46**: agregados: determinação de material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003a.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003b.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 24**: materiais pozolânicos-determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003c.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 25**: materiais pozolânicos-determinação do teor de álcalis disponíveis. Rio de Janeiro, 2003d.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14001**: sistemas de gestão ambiental: requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2004a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15114**: resíduos sólidos da construção civil: áreas de reciclagem: diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15112**: resíduos da construção civil e resíduos volumosos: áreas de transbordo e triagem-diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.

\_\_\_\_\_. **NBR 15116**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004d.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004e.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2004f.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 9000**: sistemas de gestão da qualidade: fundamentos e vocabulário. Rio de Janeiro, 2005a.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005b.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 26**: agregados: amostragem. Rio de Janeiro, 2009b.

\_\_\_\_\_. **NBR 9917**: agregados para concreto: determinação de sais, cloretos, sulfato solúveis. Rio de Janeiro, 2009c.

\_\_\_\_\_. **NBR 7389**: apreciação petrografia de materiais naturais, para utilização como agregado de concreto, parte 1: agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2009d.

\_\_\_\_\_. **NBR 7218**: agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15895**: materiais pozolânicos: determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado: método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894-3**: metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, parte 3: determinação da finura por meio da peneira 45µm. Rio de Janeiro, 2010c.

\_\_\_\_\_. **NBR 9.935**: agregados: terminologia. Rio de Janeiro, 2011a.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011b.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 22**: cimento Portland com adição de materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2012a.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18**: cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012b.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752**: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2015a.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2015b.

\_\_\_\_\_. **NBR 5751**: materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias. Rio de Janeiro, 2015c.

ABRECON. **Relatório pesquisa setorial 2014/2015**. São Paulo, 2015.

AGRELA, F. *et al.* Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 3950–3955, 2011.

ALDERETE, N. *et al.* Pore structure description of mortars containing ground granulated blast-furnace slag by mercury intrusion porosimetry and dynamic vapour sorption. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 157–165, 2017.



ANDREÃO, P.V.; CORDEIRO, C.C. **Avaliação da atividade pozolânica de uma cinza do bagaço de cana-de-açúcar produzida com requeima conjugada e moagem ultrafina**. In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção. 2017. Fortaleza, CE. Anais ENARC, p. 874–888, 2017.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

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

ANGULO *et al.* Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. **Waste Management**, v. 29, p. 721–730, 2009.

ANGULO *et al.* Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, n. 11, p. 299–306, 2011.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Agregados Reciclados**. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Ed. G. C. ISAIA. 1.ed. v.1. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto: IBRACON, 2011.

ARVANITI, E. C. *et al.* Determination of particle size, surface area, and shape of supplementary cementitious materials by different techniques. **Materials and Structures**, v. 48, n. 11, out. 2014.

BALDUSCO DA SILVA, R. *et al.* Concretos secos produzidos com agregados reciclados de RCD separados por densidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 335-349, 2015.

BALDUSCO, R. *et al.* **Reatividade e resistência mecânica de pastas reidratadas de cimento de alto forno**. In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção. Fortaleza, CE. Anais ENARC, p. 901–916, 2017.

BS-8500. Concrete – complementary British Standard to **BS EN 206-1** – Part 2: specification for constituent materials and concrete. UK: British Standards Institution; p. 52, 2006.

BEDOYA, C.; DZUL, L. Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project. **Revista Ingenieria de Construccion**, v. 30, n. 2, p. 99–108, 2015.

BONIFAZI, G.; PALMIERI, R.; SERRANTI, S. Evaluation of attached mortar on recycled concrete aggregates by hyperspectral imaging. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 835–842, 2018.

BOUDALI, S. *et al.* Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 705–713, 2016.

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

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução 307.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **DOU**, nº 136, p. 95-96, Brasília, 17 jul. 2002.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concretos em blocos de alvenaria estrutural.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CABRAL, A. E. B *et al.* **Determinação da influência do tipo de agregado reciclado de resíduo de construção e demolição sobre o módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados.** In: IBRACON, v. 1, p. 171-192 2008.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios. 2** Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 5, ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

CHENG, S. *et al.* Durability and microstructure of coral sand concrete incorporating supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 44–53, 2018.

CHOI, Y. C.; KIM, J.; CHOI, S. Mercury intrusion porosimetry characterization of micropore structures of high-strength cement pastes incorporating high volume ground granulated blast-furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 96–103, 2017.

CORDEIRO, G. C.; DÉsir, J M. Potencial de argila caulínica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Cerâmica**, vol. 56, p. 71–76, 2010.

CORDEIRO, C. C. *et al.* Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. **Cement & Concrete Composites**, vol. 33, p. 529–534, 2011.

CORDEIRO, G. C.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, vol. 89, p. 269–275, 2016.

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

CORRÊA, C. A. R.; RÊGO, J. H.; FEITOSA, C. H. **Minucious characterization of granulometric fractions of two fine recycled aggregate**. In: IV International Conference Progress of Recycling in the Built Environment Anais RILEN, 2018, p. 116–123 681, Lisbon, Portugal, 2018.

DE JUAN, M. S. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural**. Tese (Doutorado em Ciências Tecnológicas) - Departamento de Engenharia Civil e Construção, Escola Técnica Superior de Engenheiros de Caminos, Canales e Puertos, 2005.

DE 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.

DE SCHEPPER, M. *et al.* Sulfates in Completely Recyclable Concrete and the effect of CaSO<sub>4</sub> on the clinker mineralogy. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 300–306, 2017.

DODDS, W. *et al.* Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 183–195, 2017.

ELAQRA, A. H. Valorization of recycled aggregate in concrete and mortar **Journal of Natural and Engineering Studies** , v. 23, n. 5, p. 26–37, 2015.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735–742, 2007.

EUROPEAN°DISPOSABLES°AND°NONWOVENS°ASSOCIATION.°EDANA°ER T°420.2-02b°. Recommended test method particle size distribution-sieve fractionation.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 397–401, 2007.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9–14, 2010.

EVANGELISTA, L. *et al.* Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 178–188, 2015.

FAN, C. C. *et al.* Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 708–715, 2016.

FRÖHLICH, J.; KULAKOWSKI, M. P.; DE ABREU, A. G. **Viabilidade de uso de resíduo cerâmico vermelho na produção de cimento ecoeficiente.** In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção. Fortaleza, CE. Anais ENARC, p. 635–650, 2017.

GAYARRE, F. L. **Influência de la variación de los parámetros De Dosificación Y Fabricación De Hormigón Reciclado Estructural Sobre Sus Propiedades Físicas Y Mecánicas.** Tese (Doutorado em Ciências Tecnológicas) - Departamento de Construção e Engenharia de Fabricação, Universidade de Oviedo, Gijón, 2008.

GAYARRE, F. L. *et al.* Influence of the ceramic recycled aggregates in the masonry mortars properties. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 457–461, 2017.

GALLETTO, A. *et al.* **Caracterização físico-química e mecânica de argamassa com resíduo de concreto.** In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção. Anais ENARC, 2017, p. 666–681, Fortaleza, CE, 2017.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. **DIN 4226-100:** aggregates for Mortar and Concrete, Part 100: Recycled Aggregates, Germany, 2002.

\_\_\_\_\_. **DIN°66131:** Determination of specific surface area of solids by gas adsorption using the method of brunauer, emmett and teller (BET).

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. **GDF \_ Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos -125 PDGIRS,** Brasília, 2018.

GIRARDI, A.C.C.; MARTINS FILHO, P.C.; CARASEK. H. **Análise comparativa de parâmetros de argamassas produzidas om agregado reciclado de RCD misto e cimentício.** In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção. Anais ENARC, 2017, p. 666–681, Fortaleza, CE, 2017.

GOBBO, L. D. **Aplicação da difração de raios X e método de Rietveld no estudo do cimento Portland.** 2009. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2009.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M.G Relationship between gas absorption and the shrinkage and creep of recycled aggregate concrete. **Cement, Concrete and Aggregates.** Vol 25, n 2, p 42-48, 2003.

GOMES, P. C. C. *et al.* Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 31–46, 2015.

GONÇALVES, J. M. C. L. **Concrete with recycled aggregates commented analysis of exististing legislation.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

GONÇALVES, J. M. C. L, DE BRITO, J. Recycled aggregate concrete (RAC) -

comparative analysis of existing specifications. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 5, pg. 339- 346, 2010.

GONG, F. *et al.* Empirical estimation of pore size distribution in cement, mortar and concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, 2014.

GONZALEZ, C. B. *et al.* Microstructure and mineralogy of lightweight aggregates manufactured from mining and industrial wastes. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3591–3602, 2011.

GUILLANTE, P. *et al.* **Efeito sinérgico da cinza de casca de arroz e do resíduo de cerâmica vermelha na mitigação da RAA.** In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção. Anais ENARC, 2017, p. 666–681, Fortaleza, CE, 2017.

GUJEL, D. A. **Avaliação do comportamento elástico de concretos produzidos com substituição parcial dos agregados graúdos naturais por reciclados de concreto a partir de ensaios estático e dinâmico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.

HAIR, J; BLACK, *et al.* **Multivariate Data Analysis.** 7. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2009.

HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled made from crushed concrete coarse agregate. **Concrete International**, v. 5, n 1, 1983.

HANSEN, T. C. **Recycling of Demolished Concrete and Masonry.** Londres: Taylor & Francis, 1992.

HO, H. L. *et al.* Pore-structures and durability of concrete containing pre-coated fine recycled mixed aggregates using pozzolan and polyvinyl alcohol materials. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 278–292, 2018.

HWANG, J. P. *et al.* Enhancing the durability properties of concrete containing recycled aggregate by the use of pozzolanic materials. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 1, p. 155–163, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320:2009:** Particle size analysis – laser diffraction methods. STANDARDIZATION I. O. F.

INTERNATIONAL UNION OF TESTING AND RESEARCH LABORATORIES FOR MATERIALS AND STRUCTURES. **RILEM RECOMMENDATION:** Specifications for concrete with recycled aggregates, Materials and Structures, 27 , 557 – 559, 1994.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M.A.; SILVA, M. G. **Cinza e aglomerantes alternativos.** In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A.L. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: Editora da UNICAMP, cap.6, p. 145-190, 2003.

KAHN, H. *et al.* Automated Image Analysis on the Quantification of Recycled Aggregates Phases 2 Materiais e Métodos. **HOLOS**, v. 3, p. 44–52, 2014.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 703–711, 2002.

KONG, D. *et al.* Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 701–708, 2010.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, ESPECIFICAÇÃO. **LNEC°E°471**: Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. Portugal, 2006.'

LAVAT, A. E.; TREZZA, M. A.; POGGI, M. Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. **Waste Management**, v. 29, n. 5, p. 1666–1674, 2009.

LEDESMA, E. F. *et al.* Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 289–298, 2014.

LEE, G. C; CHOI H. B. Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 455-460, 2013.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, v. 81, p. 38–48, 2016.

LEVY, S. L. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LI *et al.* A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 9, p. 1341-1349, 2010.

LI. *et al.* Properties of cement-based bricks with oyster-shells ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, n. 15, p. 279-287, mar. 2015.

LI *et al.* Effects of nano-particles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 142, n. 1, p. 42-50, jul. 2017.

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. *et al.* Influência da pré-saturação do agregado miúdo reciclado na viscosidade e resistência à compressão de argamassas. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 85–98, 2014.

MANZANO, M. AL. R. **Estudo Experimental de Materiais Cimentícios de Alta Resistência modificados com Polímeros Superabsorventes (PSAs) como agentes de cura interna**. 2016. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MARQUES, M. **Lixão da Estrutural é fechado e rejeitos passam a ser descartados em aterro**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/lixao-da-estruturale-fechado-e-rejeitos-passam-a-ser-descartados-em-aterro.ghtml>>. Acesso em: 26 nov. 2018.

MARTINEZ, L. F.; FERREIRA, A. I. **Análise de dados com SPSS: primeiros passos**. São Paulo: Escolar, 2010.

MARTÍNEZ, I. *et al.* A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 384–392, 2013.

MAS, B; *et al.* Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 430-441, set. 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª ed. Editora Ibracon. [s.l: s.n.], 2014.

MIRANDA, L. F. R. *et al.* Use of recycled sand produced at construction sites in bedding mortars. **Journal of Materials in Civil Engineering Engineering**, v. 25, n. 2, p. 236–242, 2013.

MIRANDA, R. J. N. **Betão com agregados reciclados: estado da arte e análise à gestão e utilização na Região Autónoma da Madeira**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Competência de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Funchal, Portugal, 2014.

MIRANDA, R. C. C. **Relações entre valores, gestão de práticas, comprometimento e resultados organizacionais em instituições transculturais**. (Tese de Doutorado). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

OBJECTIF TECHNIQUE. **OT 70085**: Instruction technique. Utilisation de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d'abris, Switzerland, 2006.

PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y.; DE BRITO, J. **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. 2ª ed. Oxford: [s.n.], 2013.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. 1ª ed. Curitiba: Hemus, 1997.

PARIS, J. M. *et al.* A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1-18, 2016.

PAVÓN, E. **Empleo del árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, CUJAE, Habana, 2010.

PAVÓN, E., MARTÍNEZ, I. A, ETXEBERRIA, M. The production of construction and demolition waste material and the use of recycled aggregates in Havana, Cuba. **Revista Facultad de Ingeniería**, n. 71, p. 167–178, 2014.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Durability performance of sustainable structural concrete: Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 294–309, 2017.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2008.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, n. 9, p. 1044-1052, 2012.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 6, p. 461–468, 2004.

QUANTACHROME INSTRUMENTS. Gas Sorption System Operating Manual. Model 6, Version 4. 2015.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environmental**, v. 42, p. 407-415, 2007.

RATO, V. N. D. P. M. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006.

REED, S. J. B. **Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology**. 2ª ed. New York: Cambridge University Press, 2005.

RESTUCCIA, L. *et al.* Recycled Mortars with C & D Waste. **Procedia Structural Integrity**, v. 2, p. 2896–2904, 2016.

RIBAS, J. R.; VIEIRA, P. R. C. **Análise multivariada com o uso do SPSS**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2011.



RODRIGUES, C.R.S; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 99–111, 2014.

ROSA, M. **Análise do efeito do teor de microfinos nas propriedades das argamassas de revestimento, com a utilização de areia de britagem basáltica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2013.

SALOMÃO M. C. F. **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água**. 2016. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SANTOS, W. F. **Tratamento superficial dos agregados reciclados de RCD com hidrofugantes**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. 1ª ed. London: CRC Press, 2016.

SHI, T. *et al.* Evaluation of alkali reactivity of concrete aggregates via AC impedance spectroscopy. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 548–554, 2017.

SILVA, R.V. DE 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. 63, p. 201–217, 2014.

SOLYMAN, M. **Classification of Recycled Sands and their Applications as Fine Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures Klassifizierung von Recycling - Brechsanden und ihre Anwendungen für Beton und für Straßenbaustoffe**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Bauingenieurwesen der Universität Kassel, Kassel, 2005.

SOMNA, R. *et al.* Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Materials and Design**, vol. 36, p. 597-603, 2012.

TAM, V. W. Y; GAO, X. F.; Tam, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1195–1203, 2005.

TAM, V. W. Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. **Resources, Conservation and Recycling**. v 52, p. 821–828, 2008.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. 3rd ed.; Thomas Telford: London, UK, 1997.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

TENORIO, J. J. *et al.* Concreto produzido com agregados reciclado. **IBRACON**, v. 5, n. 5, p. 692–701, 2012.

THOMSON, M. *et al.* Porosity of historic mortars. **13th International Brick and Block Masonry Conference**, n. July, p. CD, 2004.

TOPCU, I. B.; SENDEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**. v. 34, n. 8, 1307 – 1312, 2004.

ULSEN, C.; *et al.* Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. **Mineração**, v. 63, n. 2, p. 339–346, 2010.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

ULSEN, C. *et al.* Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. **Waste Management**, v. 33, n. 3, p. 656–662, 2013a.

ULSEN, C. *et al.* Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1168–1173, 2013b.

ULSEN, C. *et al.* Separabilidade de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição de diferentes origens. **Holos**, v. I, p. 8, 2014.

VARGAS, P.; RESTREPO-BAENA, O.; TOBÓN, J. I. Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 381–389, 2017.

WU, B.; YE, G. Development of porosity of cement paste blended with supplementary cementitious materials after carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 52–61, 2017.

YING, J., ZHOU, B., XIAO, J. Pore structure and chloride diffusivity of recycled aggregate concrete with nano-SiO<sub>2</sub> and nano-TiO<sub>2</sub>. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 49–55, 2017.

ZEGA, C. J.; DI MAIO, A. A. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. **Waste Management**. v. 31, 2336 – 2340, 2011.

## APÊNDICE A – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AREIAS

**Tabela A1: Ensaios de caracterização física da areia AR1.**

| Ensaio  | Fração Grossa | Fração Média. G | Fração M. Fina | Fração Fina | Areia Composta | Fração Pulverulenta | Areia Primária |
|---|---------------|-----------------|----------------|-------------|----------------|---------------------|----------------|
| massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )           | 1297,11       | 1266,80         | 1326,38        | 1326,38     | 1510,77        | 1292,06             | 1633,58        |
| massa unitária SSS (kg/m <sup>3</sup> )       | 1367,59       | 1333,05         | 1364,84        | 1352,90     | 1553,10        | 1319,19             | 1646,81        |
| absorção (%)                                  | 5,40          | 5,20            | 2,90           | 1,70        | 2,80           | 2,10                | 0,80           |
| massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )    | 1,98          | 1,98            | 2,19           | 2,17        | 2,05           | 2,06                | 2,26           |
| massa específica SSS. (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,10          | 2,10            | 2,13           | 2,20        | 2,21           | 2,129               | 2,30           |
| massa específica. (g/cm <sup>3</sup> )        | 2,26          | 2,24            | 2,19           | 2,27        | 2,30           | 2,20                | 2,38           |
| massa específica.Chapman (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,44          | 2,50            | 2,54           | 2,66        | 2,56           | 2,67                | 2,58           |
| teor de material passante na malha 75 µm (%)  | 1,02          | 1,02            | 1,05           | 1,02        | 1,45           | -                   | 4,00           |
| D <sub>max</sub> carac (mm)                   | -             | -               | -              | -           | -              | -                   | 9,50           |
| módulo de finura                              | -             | -               | -              | -           | -              | -                   | 1,32           |

**Tabela A2: Ensaios de caracterização física da areia AR1 após lavagem em laboratório.**

| Ensaio  | Fração Grossa | Fração Média G | Fração M. Fina | Fração Fina | Areia composta | Areia Primária |
|---|---------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|
| massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )           | 1290,62       | 1260,47        | 1320           | 1319,79     | 1503,22        | 1625,17        |
| massa unitária SSS (kg/m <sup>3</sup> )       | 1360,31       | 1329,78        | 1344,295       | 1349,18     | 1548,31        | 1644,67        |
| absorção (%)                                  | 5,40          | 5,50           | 1,86           | 2,24        | 3,00           | 1,20           |
| massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,01          | 2,006          | 2,20           | 2,14        | 1,77           | 2,17           |
| massa específica SSS. (g/cm <sup>3</sup> )    | 1,88          | 2,12           | 1,866          | 2,19        | 1,83           | 2,21           |
| massa específica. (g/cm <sup>3</sup> )        | 1,99          | 2,11           | 1,90           | 2,24        | 1,88           | 2,11           |
| massa específica.Chapman (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,46          | 1,67           | 2,55           | 2,63        | 2,64           | 2,58           |
| teor de material passante na malha 75 µm (%)  | 0,10          | 0,10           | 0,20           | 0,30        | 0,20           | 0,10           |
| D <sub>max</sub> carac (mm)                   | -             | -              | -              | -           | -              | 9,5            |
| módulo de finura                              | -             | -              | -              | -           | -              | 2,59           |

**Tabela A3: Ensaio de caracterização física da areia AR2**

| <b>Ensaio</b>                                 | <b>Fração Grossa</b> | <b>Fração Média G</b> | <b>Fração M. Fina</b> | <b>Fração Fina</b> | <b>Areia Composta</b> | <b>Fração pulverulenta</b> |
|---|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------|
| massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )           | 1371,14              | 1307,20               | 1123,83               | 1177,66            | 1441,79               | 952,22                     |
| massa unitária SSS (kg/m <sup>3</sup> )       | 1424,20              | 1341,056              | 1179,79               | 1222,767           | 1486,59               | 1042,88                    |
| absorção (%)                                  | 3,87                 | 2,59                  | 4,98                  | 3,83               | 3,11                  | 9,54                       |
| massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,09                 | 2,145                 | 1,677                 | 2,01               | 2,05                  | 2,13                       |
| massa específica SSS. (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,18                 | 2,266                 | 1,83                  | 2,26               | 2,21                  | 2,27                       |
| massa específica. (g/cm <sup>3</sup> )        | 2,29                 | 2,427                 | 2,15                  | 2,67               | 2,42                  | 2,45                       |
| massa específica.Chapman (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,55                 | 2,46                  | 2,38                  | 2,34               | 2,44                  | 2,38                       |
| teor de material passante na malha 75 µm (%)  | 4,41                 | 8,29                  | 13,74                 | 17,80              | 16,00                 | -                          |

**Tabela A4: Ensaio de caracterização física da areia AR2 após lavagem em laboratório.**

| <b>Ensaio</b>                                 | <b>Fração Grossa</b> | <b>Fração Média G</b> | <b>Fração M. Fina</b> | <b>Fração Fina</b> | <b>Areia Composta</b> |
|---|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )           | 1318,98              | 1257,47               | 1081,07               | 1132,86            | 1386,94               |
| massa unitária SSS (kg/m <sup>3</sup> )       | 1333,75              | 1306,46               | 1142,69               | 1176,81            | 1427,30               |
| absorção (%)                                  | 1,12                 | 3,90                  | 5,70                  | 3,88               | 2,91                  |
| massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,64                 | 2,20                  | 2,02                  | 1,82               | 2,12                  |
| massa específica SSS. (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,71                 | 2,32                  | 2,18                  | 1,98               | 2,26                  |
| massa específica. (g/cm <sup>3</sup> )        | 2,82                 | 2,49                  | 2,41                  | 2,16               | 2,47                  |
| massa específica.Chapman (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,47                 | 2,45                  | 2,38                  | 2,39               | 2,45                  |
| teor de material passante na malha 75 µm (%)  | 1,20                 | 2,90                  | 3,05                  | 7,80               | 3,44                  |

**Tabela A5: Ensaio de caracterização física da areia AN.**

| <b>Ensaio</b>                                 | <b>Fração Grossa</b> | <b>Fração Média G</b> | <b>Fração M. Fina</b> | <b>Fração Fina</b> | <b>Areia Composta</b> |
|---|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )           | 1507,408             | 1448,525              | 1396,37               | 1391,32            | 1567,97               |
| massa unitária SSS (kg/m <sup>3</sup> )       | 1509,94              | 1463,01               | 1408,94               | 1395,77            | 1582,55               |
| absorção (%)                                  | 0,17                 | 1                     | 0,9                   | 0,32               | 0,93                  |
| massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,35                 | 2,64                  | 2,34                  | 2,11               | 2,3                   |
| massa específica SSS. (g/cm <sup>3</sup> )    | 2,35                 | 2,64                  | 2,35                  | 2,14               | 2,31                  |
| massa específica. (g/cm <sup>3</sup> )        | 2,36                 | 2,64                  | 2,37                  | 2,15               | 2,32                  |
| massa específica.Chapman (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,63                 | 2,61                  | 2,6                   | 2,64               | 2,62                  |
| teor de material passante na malha 75 µm (%)  | 0,19                 | 0,16                  | 0,24                  | 0,89               | -                     |

**Tabela A6: Teste de amostras independentes massa unitária (AN, AR1 e AR2).**

| Teste de amostras independentes    |                                 |  |       |         |       |                                  |                 |                          |           |   |  |
|------------------------------------|---------------------------------|--|-------|---------|-------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|-----------|---|--|
|                                    |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       |         |       | teste-t para igualdade de Médias |                 |                          |           | 95% Intervalo de confiança da diferença |  |
|                                    |                                 | F  | Sig.  | t       | df    | Sig. (2 extremidades)            | Diferença média | Erro padrão de diferença | Inferior  | Superior                                |  |
| MU - Grossa Referência e G1        | Variâncias iguais assumidas     | 6386039201422130,000                         | ,000  | 168,598 | 2     | ,000                             | 210,29800       | 1,24733                  | 204,93115 | 215,66485                               |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 168,598 | 1,572 | ,000                             | 210,29800       | 1,24733                  | 203,25707 | 217,33893                               |  |
| MU - Média Grossa Referência e MG1 | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 128,794 | 2     | ,000                             | 151,41500       | 1,17564                  | 146,35664 | 156,47336                               |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 128,794 | 1,649 | ,000                             | 151,41500       | 1,17564                  | 145,16972 | 157,66028                               |  |
| MU - Média Fina Referência e MF1   | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 97,415  | 2     | ,000                             | 69,99000        | ,71847                   | 66,89867  | 73,08133                                |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 97,415  | 1,048 | ,005                             | 69,99000        | ,71847                   | 61,79173  | 78,18827                                |  |
| MU - Fina Referência e F1          | Variâncias iguais assumidas     | 1101935414453200000,000                      | 0,000 | 8,596   | 2     | ,013                             | 64,94000        | 7,55500                  | 32,43344  | 97,44656                                |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 8,596   | 1,029 | ,070                             | 64,94000        | 7,55500                  | -24,80555 | 154,68555                               |  |
| MU - Fracionada Referência e Fr1   | Variâncias iguais assumidas     | 25069514666773000,000                        | 0,000 | 42,771  | 2     | ,001                             | 57,20000        | 1,33735                  | 51,44586  | 62,95414                                |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 42,771  | 1,022 | ,014                             | 57,20000        | 1,33735                  | 41,05361  | 73,34639                                |  |
| MU - Grossa Referência e G2        | Variâncias iguais assumidas     | 122320471751215000,000                       | 0,000 | 56,064  | 2     | ,000                             | 188,42800       | 3,36097                  | 173,96690 | 202,88910                               |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 56,064  | 1,231 | ,005                             | 188,42800       | 3,36097                  | 160,69229 | 216,16371                               |  |
| MU - Média Grossa Referência e MG2 | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 166,153 | 2     | ,000                             | 367,45500       | 2,21154                  | 357,93950 | 376,97050                               |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 166,153 | 1,487 | ,000                             | 367,45500       | 2,21154                  | 353,99105 | 380,91895                               |  |
| MU - Média Fina Referência e MF2   | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 366,765 | 2     | ,000                             | 263,51000       | ,71847                   | 260,41867 | 266,60133                               |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 366,765 | 1,048 | ,001                             | 263,51000       | ,71847                   | 255,31173 | 271,70827                               |  |
| MU - Fina Referência e F2          | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 34,308  | 2     | ,001                             | 258,46000       | 7,53353                  | 226,04583 | 290,87417                               |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 34,308  | 1,018 | ,017                             | 258,46000       | 7,53353                  | 166,62963 | 350,29037                               |  |
| MU - Fracionada Referência e Fr2   | Variâncias iguais assumidas     | 1593288835540650,000                         | ,000  | 107,615 | 2     | ,000                             | 181,03000       | 1,68220                  | 173,79207 | 188,26793                               |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 107,615 | 1,882 | ,000                             | 181,03000       | 1,68220                  | 173,34008 | 188,71992                               |  |
| MU - Grossa 1 e 2                  | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -6,754  | 2     | ,021                             | -21,87000       | 3,23798                  | -35,80189 | -7,93811                                |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -6,754  | 1,073 | ,083                             | -21,87000       | 3,23798                  | -56,91837 | 13,17837                                |  |
| MU - Média Grossa 1 e 2            | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 3,373   | 2     | ,078                             | 9,33000         | 2,76574                  | -2,57000  | 21,23000                                |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 3,373   | 1,785 | ,091                             | 9,33000         | 2,76574                  | -4,05696  | 22,71696                                |  |
| MU - Média Fina 1 e 2              | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 117,147 | 2     | ,000                             | 245,31000       | 2,09404                  | 236,30008 | 254,31992                               |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 117,147 | 1,255 | ,002                             | 245,31000       | 2,09404                  | 228,62884 | 261,99116                               |  |
| MU - Fina 1 e 2                    | Variâncias iguais assumidas     | 1014951530878570,000                         | ,000  | 167,665 | 2     | ,000                             | 193,52000       | 1,15421                  | 188,55384 | 198,48616                               |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 167,665 | 1,888 | ,000                             | 193,52000       | 1,15421                  | 188,26144 | 198,77856                               |  |
| MU - Fracionada 1 e 2              | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 119,128 | 2     | ,000                             | 123,83000       | 1,0395                   | 119,3575  | 128,3025                                |  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 119,128 | 1,037 | ,005                             | 123,83000       | 1,0395                   | 111,6838  | 135,9762                                |  |

**Tabela A7: Teste de amostras independentes absorção de água (AN, AR1 e AR2).**

| Teste de amostras independentes    |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |           |
|------------------------------------|---------------------------------|--|-------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|-----------|
|                                    |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       | teste-t para igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |           |
|                                    |                                 | F  | Sig.  | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |           |
|                                    |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          | Inferior                                | Superior  |
| EV - Grossa Referência e G1        | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 1,140                            | 2     | ,372                  | 1,30000         | 1,14018                  | -3,60578                                | 6,20578   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 1,140                            | 1,148 | ,439                  | 1,30000         | 1,14018                  | -9,44144                                | 12,04144  |
| EV - Média Grossa Referência e MG1 | Variâncias iguais assumidas     | 161971411378914000,000                       | 0,000 | 16,527                           | 2     | ,004                  | 8,90000         | ,53852                   | 6,58295                                 | 11,21705  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 16,527                           | 1,312 | ,018                  | 8,90000         | ,53852                   | 4,92273                                 | 12,87727  |
| EV - Média Fina Referência e MF1   | Variâncias iguais assumidas     | 9086228703950710000,000                      | 0,000 | 3,760                            | 2     | ,064                  | 4,14000         | 1,10114                  | -,59780                                 | 8,87780   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 3,760                            | 1,004 | ,165                  | 4,14000         | 1,10114                  | -9,71593                                | 17,99593  |
| EV - Fina Referência e F1          | Variâncias iguais assumidas     | 7251976245267180,000                         | ,000  | -4,425                           | 2     | ,047                  | -4,73000        | 1,06888                  | -9,32901                                | -,13099   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -4,425                           | 1,072 | ,129                  | -4,73000        | 1,06888                  | -16,32365                               | 6,86365   |
| EV - Fracionada Referência e Fr1   | Variâncias iguais assumidas     | 20362254406012100,000                        | 0,000 | 2,916                            | 2     | ,100                  | 2,73000         | ,93622                   | -1,29821                                | 6,75821   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 2,916                            | 1,116 | ,189                  | 2,73000         | ,93622                   | -6,59871                                | 12,05871  |
| EV - Grossa Referência e G2        | Variâncias iguais assumidas     | 6030348174768710,000                         | ,000  | -10,428                          | 2     | ,009                  | -14,37000       | 1,37801                  | -20,29908                               | -8,44092  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -10,428                          | 1,860 | ,012                  | -14,37000       | 1,37801                  | -20,74820                               | -7,99180  |
| EV - Média Grossa Referência e MG2 | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 3,871                            | 2     | ,061                  | 2,01000         | ,51923                   | -,22407                                 | 4,24407   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 3,871                            | 1,156 | ,134                  | 2,01000         | ,51923                   | -2,81580                                | 6,83580   |
| EV - Média Fina Referência e MF2   | Variâncias iguais assumidas     | 32309887538293400000,000                     | 0,000 | -3,024                           | 2     | ,094                  | -6,14000        | 2,03062                  | -14,87703                               | 2,59703   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -3,024                           | 1,001 | ,203                  | -6,14000        | 2,03062                  | -31,86765                               | 19,58765  |
| EV - Fina Referência e F2          | Variâncias iguais assumidas     | 10467978284431200,000                        | ,000  | -3,897                           | 2     | ,060                  | -3,86000        | ,99040                   | -8,12136                                | -,40136   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -3,897                           | 1,085 | ,145                  | -3,86000        | ,99040                   | -14,34043                               | 6,62043   |
| EV - Fracionada Referência e Fr2   | Variâncias iguais assumidas     | 1720877622405990,000                         | ,000  | -2,488                           | 2     | ,131                  | -2,74000        | 1,10114                  | -7,47780                                | 1,99780   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -2,488                           | 1,764 | ,147                  | -2,74000        | 1,10114                  | -8,14088                                | 2,66088   |
| EV - Grossa 1 e 2                  | Variâncias iguais assumidas     | 23236279866838700,000                        | 0,000 | -17,755                          | 2     | ,003                  | -15,67000       | ,88255                   | -19,46732                               | -11,87268 |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -17,755                          | 1,257 | ,018                  | -15,67000       | ,88255                   | -22,68635                               | -8,65365  |
| EV - Média Grossa 1 e 2            | Variâncias iguais assumidas     | 6478856455156250,000                         | ,000  | -28,223                          | 2     | ,001                  | -6,89000        | ,24413                   | -7,94041                                | -5,83959  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -28,223                          | 1,790 | ,002                  | -6,89000        | ,24413                   | -8,06762                                | -5,71238  |
| EV - Média Fina 1 e 2              | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -4,452                           | 2     | ,047                  | -10,28000       | 2,30887                  | -20,21428                               | -,34572   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -4,452                           | 1,541 | ,074                  | -10,28000       | 2,30887                  | -23,66996                               | 3,10996   |
| EV - Fina 1 e 2                    | Variâncias iguais assumidas     | 41998990420400,800                           | ,000  | ,609                             | 2     | ,605                  | ,87000          | 1,42948                  | -5,28054                                | 7,02054   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,609                             | 1,988 | ,605                  | ,87000          | 1,42948                  | -5,31755                                | 7,05755   |
| EV - Fracionada 1 e 2              | Variâncias iguais assumidas     | 5539432824480430,000                         | ,000  | -8,315                           | 2     | ,014                  | -5,47000        | ,65788                   | -8,30061                                | -2,63939  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -8,315                           | 1,248 | ,048                  | -5,47000        | ,65788                   | -10,76728                               | -,17272   |

**Tabela A8: Teste de amostras independentes massa específica (AN, AR1 e AR2).**

| Teste de amostras independentes    |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |          |
|------------------------------------|---------------------------------|--|-------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|----------|
|                                    |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       | teste-t para Igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |          |
|                                    |                                 | F  | Sig.  | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |          |
|                                    |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          | Inferior                                | Superior |
| ME - Grossa Referência e G1        | Variâncias iguais assumidas     | 0,000  | 1,000 | 13,081                           | 2     | ,006                  | ,37000          | ,02828                   | ,24830                                  | ,49170   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 13,081                           | 2,000 | ,006                  | ,37000          | ,02828                   | ,24830                                  | ,49170   |
| ME - Média Grossa Referência e MG1 | Variâncias iguais assumidas     | #####  | ,000  | 12,256                           | 2     | ,007                  | ,66000          | ,05385                   | ,42830                                  | ,89170   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 12,256                           | 1,312 | ,026                  | ,66000          | ,05385                   | ,26227                                  | 1,05773  |
| ME - Média Fina Referência e MF1   | Variâncias iguais assumidas     | #####  | 0,000 | 5,938                            | 2     | ,027                  | ,25500          | ,04294                   | ,07024                                  | ,43976   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 5,938                            | 1,515 | ,050                  | ,25500          | ,04294                   | ,00008                                  | ,50992   |
| ME - Fina Referência e F1          | Variâncias iguais assumidas     | #####  | 0,000 | -3,000                           | 2     | ,095                  | -,06000         | ,02000                   | -,14605                                 | ,02605   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -3,000                           | 1,000 | ,205                  | -,06000         | ,02000                   | -,31412                                 | ,19412   |
| ME - Fracionada Referência e Fr1   | Variâncias iguais assumidas     |  |       | ,888                             | 2     | ,468                  | ,25000          | ,28160                   | -,96164                                 | 1,46164  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,888                             | 1,174 | ,519                  | ,25000          | ,28160                   | -2,28804                                | 2,78804  |
| ME - Grossa Referência e G2        | Variâncias iguais assumidas     | #####  | 0,000 | -3,378                           | 2     | ,078                  | -,29500         | ,08732                   | -,67071                                 | ,08071   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -3,378                           | 1,110 | ,163                  | -,29500         | ,08732                   | -1,17499                                | ,58499   |
| ME - Média Grossa Referência e MG2 | Variâncias iguais assumidas     | #####  | 0,000 | 2,571                            | 2     | ,124                  | ,44000          | ,17117                   | -,29650                                 | 1,17650  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 2,571                            | 1,028 | ,231                  | ,44000          | ,17117                   | -1,60130                                | 2,48130  |
| ME - Média Fina Referência e MF2   | Variâncias iguais assumidas     | #####  | 0,000 | 5,060                            | 2     | ,037                  | ,32000          | ,06325                   | ,04788                                  | ,59212   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 5,060                            | 1,220 | ,092                  | ,32000          | ,06325                   | -,21088                                 | ,85088   |
| ME - Fina Referência e F2          | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 7,944                            | 2     | ,015                  | ,28600          | ,03600                   | ,13110                                  | ,44090   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 7,944                            | 1,000 | ,080                  | ,28600          | ,03600                   | -,17142                                 | ,74342   |
| ME - Fracionada Referência e Fr2   | Variâncias iguais assumidas     |  |       | ,583                             | 2     | ,619                  | ,18000          | ,30887                   | -1,14896                                | 1,50896  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,583                             | 1,564 | ,633                  | ,18000          | ,30887                   | -1,57611                                | 1,93611  |
| ME - Grossa 1 e 2                  | Variâncias iguais assumidas     | #####  | 0,000 | -7,616                           | 2     | ,017                  | -,66500         | ,08732                   | -1,04071                                | -,28929  |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -7,616                           | 1,110 | ,068                  | -,66500         | ,08732                   | -1,54499                                | ,21499   |
| ME - Média Grossa 1 e 2            | Variâncias iguais assumidas     | #####  | 0,000 | -1,242                           | 2     | ,340                  | -,22000         | ,17720                   | -,98243                                 | ,54243   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -1,242                           | 1,172 | ,408                  | -,22000         | ,17720                   | -1,82370                                | 1,38370  |
| ME - Média Fina 1 e 2              | Variâncias iguais assumidas     | #####  | 0,000 | ,915                             | 2     | ,457                  | ,06500          | ,07102                   | -,24058                                 | ,37058   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,915                             | 1,691 | ,471                  | ,06500          | ,07102                   | -,30084                                 | ,43084   |
| ME - Fina 1 e 2                    | Variâncias iguais assumidas     | #####  | 0,000 | 8,402                            | 2     | ,014                  | ,34600          | ,04118                   | ,16881                                  | ,52319   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 8,402                            | 1,564 | ,028                  | ,34600          | ,04118                   | ,11185                                  | ,58015   |
| ME - Fracionada 1 e 2              | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -,412                            | 2     | ,720                  | -,07000         | ,17000                   | -,80145                                 | ,66145   |
|                                    | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -,412                            | 1,526 | ,731                  | -,07000         | ,17000                   | -1,06850                                | ,92850   |



**Tabela A9: Teste de amostras independentes massa unitária (AN).**

| Teste de amostras independentes                      |                                 |  |      |                                  |       |                       |                 |                          |   |            |
|--|---------------------------------|--|------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|------------|
|  |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |      | teste-t para Igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |            |
|  |                                 | F  | Sig. | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |            |
|  |                                 |  |      |                                  |       |                       |                 |                          | Inferior                                | Superior   |
| MU - Média Grossa Referência e Média Fina Referência | Variâncias iguais assumidas     |  |      | 51,587                           | 2     | ,000                  | 52,15500        | 1,01100                  | 47,80501                                | 56,50499   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 51,587                           | 1,024 | ,011                  | 52,15500        | 1,01100                  | 39,99790                                | 64,31210   |
| MU - Média Grossa Referência e Fina Referência       | Variâncias iguais assumidas     |  |      | 7,560                            | 2     | ,017                  | 57,20500        | 7,56704                  | 24,64667                                | 89,76333   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 7,560                            | 1,036 | ,078                  | 57,20500        | 7,56704                  | -31,41577                               | 145,82577  |
| MU - Média Grossa Referência e Fracionada Referência | Variâncias iguais assumidas     | 1869901480599570,000                         | ,000 | -71,652                          | 2     | ,000                  | -119,44500      | 1,66701                  | -126,61757                              | -112,27243 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -71,652                          | 1,861 | ,000                  | -119,44500      | 1,66701                  | -127,15534                              | -111,73466 |

| Teste de amostras independentes                    |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |            |
|--|---------------------------------|--|-------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|------------|
|  |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       | teste-t para Igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |            |
|  |                                 | F  | Sig.  | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |            |
|  |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          | Inferior                                | Superior   |
| MU - Média Fina Referência e Fina Referência       | Variâncias iguais assumidas     |  |       | ,673                             | 2     | ,570                  | 5,05000         | 7,50081                  | -27,22337                               | 37,32337   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,673                             | 1,000 | ,623                  | 5,05000         | 7,50081                  | -90,15999                               | 100,25999  |
| MU - Média Fina Referência e Fracionada Referência | Variâncias iguais assumidas     | 26349456697989800,000                        | 0,000 | -128,584                         | 2     | ,000                  | -171,60000      | 1,33454                  | -177,34207                              | -165,85793 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -128,584                         | 1,014 | ,005                  | -171,60000      | 1,33454                  | -188,02562                              | -155,17438 |
| MU - Fina Referência e Fracionada Referência       | Variâncias iguais assumidas     | 673941703903703000,000                       | 0,000 | -23,192                          | 2     | ,002                  | -176,65000      | 7,61701                  | -209,42337                              | -143,87663 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -23,192                          | 1,063 | ,023                  | -176,65000      | 7,61701                  | -260,90655                              | -92,39345  |

**Tabela A10: Teste de amostras independentes absorção de água (AN).**

| Teste de amostras independentes                      |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |          |
|--|---------------------------------|--|-------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|----------|
|  |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       | teste-t para igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |          |
|  |                                 | F  | Sig.  | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |          |
|  |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          | Inferior                                | Superior |
| AB - Grossa Referência e Média Grossa Referência     | Variâncias iguais assumidas     | ,000   | 1,000 | -29,345                          | 2     | ,001                  | -,83000         | ,02828                   | -,95170                                 | -,70830  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -29,345                          | 2,000 | ,001                  | -,83000         | ,02828                   | -,95170                                 | -,70830  |
| AB - Grossa Referência e Média Fina Referência       | Variâncias iguais assumidas     | 242756188677636000,000                       | 0,000 | -7,158                           | 2     | ,019                  | -,73000         | ,10198                   | -1,16879                                | -,29121  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -7,158                           | 1,080 | ,077                  | -,73000         | ,10198                   | -1,81986                                | ,35986   |
| AB - Grossa Referência e Fina Referência             | Variâncias iguais assumidas     | 34137589032792600,000                        | 0,000 | -2,785                           | 2     | ,108                  | -,15000         | ,05385                   | -,38170                                 | ,08170   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -2,785                           | 1,312 | ,169                  | -,15000         | ,05385                   | -,54773                                 | ,24773   |
| AB - Grossa Referência e Fracionada Referência       | Variâncias iguais assumidas     | 34137589032792600,000                        | 0,000 | -14,113                          | 2     | ,005                  | -,76000         | ,05385                   | -,99170                                 | -,52830  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -14,113                          | 1,312 | ,022                  | -,76000         | ,05385                   | -1,15773                                | -,36227  |
| AB - Media Grossa Referência e Média Fina Referência | Variâncias iguais assumidas     | 478782502817674000,000                       | 0,000 | ,981                             | 2     | ,430                  | ,10000          | ,10198                   | -,33879                                 | ,53879   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,981                             | 1,080 | ,496                  | ,10000          | ,10198                   | -,98986                                 | 1,18986  |
| AB - Media Grossa Referência e Fina Referência       | Variâncias iguais assumidas     | 67328789458735400,000                        | 0,000 | 12,627                           | 2     | ,006                  | ,68000          | ,05385                   | ,44830                                  | ,91170   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 12,627                           | 1,312 | ,025                  | ,68000          | ,05385                   | ,28227                                  | 1,07773  |
| AB - Media Grossa Referência e Fracionada Referência | Variâncias iguais assumidas     | 67328789458735400,000                        | 0,000 | 1,300                            | 2     | ,323                  | ,07000          | ,05385                   | -,16170                                 | ,30170   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 1,300                            | 1,312 | ,376                  | ,07000          | ,05385                   | -,32773                                 | ,46773   |
| AB - Media Fina Referência e Fina Referência         | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 5,188                            | 2     | ,035                  | ,58000          | ,11180                   | ,09895                                  | 1,06105  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 5,188                            | 1,471 | ,064                  | ,58000          | ,11180                   | -,11185                                 | 1,27185  |
| AB - Media Fina Referência e Fracionada Referência   | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -,268                            | 2     | ,814                  | -,03000         | ,11180                   | -,51105                                 | ,45105   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -,268                            | 1,471 | ,821                  | -,03000         | ,11180                   | -,72185                                 | ,66185   |
| AB - Fina Referência e Fracionada Referência         | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -8,627                           | 2     | ,013                  | -,61000         | ,07071                   | -,91424                                 | -,30576  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -8,627                           | 2,000 | ,013                  | -,61000         | ,07071                   | -,91424                                 | -,30576  |

**Tabela A11: Teste de amostras independentes massa específica (AN).**

| Teste de amostras independentes                      |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |          |
|--|---------------------------------|--|-------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|----------|
|  |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       | teste-t para Igualdade de Médias |       |                       |                 |                          | 95% Intervalo de confiança da diferença |          |
|  |                                 | F  | Sig.  | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | Inferior                                | Superior |
|  |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |          |
| ME - Grossa Referência e Média Grossa Referência     | Variâncias iguais assumidas     | 0,000  | 1,000 | -10,253                          | 2     | ,009                  | -,29000         | ,02828                   | -,41170                                 | -,16830  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -10,253                          | 2,000 | ,009                  | -,29000         | ,02828                   | -,41170                                 | -,16830  |
| ME - Grossa Referência e Média Fina Referência       | Variâncias iguais assumidas     | 0,000  | 1,000 | ,354                             | 2     | ,757                  | ,01000          | ,02828                   | -,11170                                 | ,13170   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,354                             | 2,000 | ,757                  | ,01000          | ,02828                   | -,11170                                 | ,13170   |
| ME - Grossa Referência e Fina Referência             | Variâncias iguais assumidas     | 29923906426104700,000                        | 0,000 | 12,000                           | 2     | ,007                  | ,24000          | ,02000                   | ,15395                                  | ,32605   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 12,000                           | 1,000 | ,053                  | ,24000          | ,02000                   | -,01412                                 | ,49412   |
| ME - Grossa Referência e Fracionada Referência       | Variâncias iguais assumidas     | 4675610379078860000,000                      | 0,000 | ,185                             | 2     | ,871                  | ,05000          | ,27074                   | -1,11490                                | 1,21490  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,185                             | 1,011 | ,883                  | ,05000          | ,27074                   | -3,30308                                | 3,40308  |
| ME - Média Grossa Referência e Média Fina Referência | Variâncias iguais assumidas     | 0,000  | 1,000 | 10,607                           | 2     | ,009                  | ,30000          | ,02828                   | ,17830                                  | ,42170   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 10,607                           | 2,000 | ,009                  | ,30000          | ,02828                   | ,17830                                  | ,42170   |
| ME - Média Grossa Referência e Fina Referência       | Variâncias iguais assumidas     | 29923906426104700,000                        | 0,000 | 26,500                           | 2     | ,001                  | ,53000          | ,02000                   | ,44395                                  | ,61605   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 26,500                           | 1,000 | ,024                  | ,53000          | ,02000                   | ,27588                                  | ,78412   |
| ME - Média Grossa Referência e Fracionada Referência | Variâncias iguais assumidas     | 4675610379078860000,000                      | 0,000 | 1,256                            | 2     | ,336                  | ,34000          | ,27074                   | -,82490                                 | 1,50490  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 1,256                            | 1,011 | ,426                  | ,34000          | ,27074                   | -3,01308                                | 3,69308  |
| ME - Média Fina Referência e Fina Referência         | Variâncias iguais assumidas     | 29923906426104700,000                        | 0,000 | 11,500                           | 2     | ,007                  | ,23000          | ,02000                   | ,14395                                  | ,31605   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 11,500                           | 1,000 | ,055                  | ,23000          | ,02000                   | -,02412                                 | ,48412   |
| ME - Média Fina Referência e Fracionada Referência   | Variâncias iguais assumidas     | 4675610379078860000,000                      | 0,000 | ,148                             | 2     | ,896                  | ,04000          | ,27074                   | -1,12490                                | 1,20490  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,148                             | 1,011 | ,906                  | ,04000          | ,27074                   | -3,31308                                | 3,39308  |
| ME - Fina Referência e Fracionada Referência         | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -,704                            | 2     | ,555                  | -,19000         | ,27000                   | -1,35172                                | ,97172   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -,704                            | 1,000 | ,610                  | -,19000         | ,27000                   | -3,62068                                | 3,24068  |

**Tabela A12: Teste de amostras independentes massa unitária (AR1).**

| Teste de amostras independentes        |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |            |
|--|---------------------------------|--|-------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|------------|
|  |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       | teste-t para igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |            |
|  |                                 | F  | Sig.  | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |            |
|  |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 | Inferior                 | Superior                                |            |
| MU - Grossa AR1 e Média Grossa AR1     | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 17,896                           | 2     | ,003                  | 30,31000        | 1,69366                  | 23,02275                                | 37,59725   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 17,896                           | 1,292 | ,017                  | 30,31000        | 1,69366                  | 17,46669                                | 43,15331   |
| MU - Grossa AR1 e Média Fina AR1       | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -31,270                          | 2     | ,001                  | -29,27000       | ,93606                   | -33,29752                               | -25,24248  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -31,270                          | 1,956 | ,001                  | -29,27000       | ,93606                   | -33,38640                               | -25,15360  |
| MU - Grossa AR1 e Fina AR1             | Variâncias iguais assumidas     | 24621279242853700,000                        | 0,000 | -39,060                          | 2     | ,001                  | -29,72500       | ,76100                   | -32,99933                               | -26,45067  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -39,060                          | 1,850 | ,001                  | -29,72500       | ,76100                   | -33,26796                               | -26,18204  |
| MU - Grossa AR1 e Fracionada AR1       | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -341,387                         | 2     | ,000                  | -213,66000      | ,62586                   | -216,35286                              | -210,96714 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -341,387                         | 1,105 | ,001                  | -213,66000      | ,62586                   | -220,03052                              | -207,28948 |
| MU - Média Grossa AR1 e Média Fina AR1 | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -34,396                          | 2     | ,001                  | -59,58000       | 1,73220                  | -67,03303                               | -52,12697  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -34,396                          | 1,388 | ,005                  | -59,58000       | 1,73220                  | -71,26479                               | -47,89521  |
| MU - Média Grossa AR1 e Fina AR1       | Variâncias iguais assumidas     | 1297036692682960000,000                      | 0,000 | -36,513                          | 2     | ,001                  | -60,03500       | 1,64421                  | -67,10946                               | -52,96054  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -36,513                          | 1,165 | ,010                  | -60,03500       | 1,64421                  | -75,08932                               | -44,98068  |
| MU - Média Grossa AR1 e Fracionada AR1 | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -153,809                         | 2     | ,000                  | -243,97000      | 1,58619                  | -250,79483                              | -237,14517 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -153,809                         | 1,016 | ,004                  | -243,97000      | 1,58619                  | -263,40290                              | -224,53710 |
| MU - Média Fina AR1 e Fina AR1         | Variâncias iguais assumidas     | 66638862966273400,000                        | 0,000 | -,540                            | 2     | ,644                  | -,45500         | ,84328                   | -4,08335                                | 3,17335    |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -,540                            | 1,703 | ,652                  | -,45500         | ,84328                   | -4,76313                                | 3,85313    |
| MU - Média Fina AR1 e fracionada AR1   | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -254,798                         | 2     | ,000                  | -184,39000      | ,72367                   | -187,50371                              | -181,27629 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -254,798                         | 1,078 | ,002                  | -184,39000      | ,72367                   | -192,15823                              | -176,62177 |
| MU - Fina AR1 e fracionada AR1         | Variâncias iguais assumidas     | 101687676706286000,000                       | 0,000 | -386,376                         | 2     | ,000                  | -183,93500      | ,47605                   | -185,98328                              | -181,88672 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -386,376                         | 1,188 | ,001                  | -183,93500      | ,47605                   | -188,13329                              | -179,73671 |

**Tabela A13: Teste de amostras independentes absorção de água (AR1).**

| Teste de amostras independentes        |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |          |
|--|---------------------------------|--|-------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|----------|
|  |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       | teste-t para Igualdade de Médias |       |                       |                 |                          | 95% Intervalo de confiança da diferença |          |
|  |                                 | F  | Sig.  | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | Inferior                                | Superior |
| AB - Grossa AR1 e Média Grossa AR1     | Variâncias iguais assumidas     | 1637890705767760,000                         | ,000  | 1,109                            | 2     | ,383                  | ,20000          | ,18028                   | -,57567                                 | ,97567   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 1,109                            | 1,742 | ,397                  | ,20000          | ,18028                   | -,69671                                 | 1,09671  |
| AB - Grossa AR1 e Média Fina AR1       | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 6,362                            | 2     | ,024                  | 2,50000         | ,39294                   | ,80933                                  | 4,19067  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 6,362                            | 1,138 | ,079                  | 2,50000         | ,39294                   | -1,26763                                | 6,26763  |
| AB - Grossa AR1 e Fina AR1             | Variâncias iguais assumidas     | 1652828269004380000,000                      | 0,000 | 35,152                           | 2     | ,001                  | 3,67000         | ,10440                   | 3,22079                                 | 4,11921  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 35,152                           | 1,179 | ,010                  | 3,67000         | ,10440                   | 2,73564                                 | 4,60436  |
| AB - Grossa AR1 e Fracionada AR1       | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 21,300                           | 2     | ,002                  | 2,60000         | ,12207                   | 2,07479                                 | 3,12521  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 21,300                           | 1,790 | ,004                  | 2,60000         | ,12207                   | 2,01119                                 | 3,18881  |
| AB - Média Grossa AR1 e Média Fina AR1 | Variâncias iguais assumidas     | 34657767334046100,000                        | 0,000 | 5,630                            | 2     | ,030                  | 2,30000         | ,40853                   | ,54222                                  | 4,05778  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 5,630                            | 1,304 | ,072                  | 2,30000         | ,40853                   | -,74742                                 | 5,34742  |
| AB - Média Grossa AR1 e Fina AR1       | Variâncias iguais assumidas     | 9415961970828410,000                         | ,000  | 22,684                           | 2     | ,002                  | 3,47000         | ,15297                   | 2,81182                                 | 4,12818  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 22,684                           | 1,080 | ,022                  | 3,47000         | ,15297                   | 1,83520                                 | 5,10480  |
| AB - Média Grossa AR1 e Fracionada AR1 | Variâncias iguais assumidas     | 4193000206765480,000                         | ,000  | 14,499                           | 2     | ,005                  | 2,40000         | ,16553                   | 1,68778                                 | 3,11222  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 14,499                           | 1,416 | ,016                  | 2,40000         | ,16553                   | 1,31677                                 | 3,48323  |
| AB - Média Fina AR1 e Fina AR1         | Variâncias iguais assumidas     | 41320706725109400000,000                     | 0,000 | 3,069                            | 2     | ,092                  | 1,17000         | ,38118                   | -,47010                                 | 2,81010  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 3,069                            | 1,012 | ,198                  | 1,17000         | ,38118                   | -3,53472                                | 5,87472  |
| AB - Média Fina AR1 e Fracionada AR1   | Variâncias iguais assumidas     |  |       | ,259                             | 2     | ,820                  | ,10000          | ,38639                   | -1,56252                                | 1,76252  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,259                             | 1,068 | ,837                  | ,10000          | ,38639                   | -4,13097                                | 4,33097  |
| AB - Fina AR1 e Fracionada AR1         | Variâncias iguais assumidas     | 539699026613675000,000                       | 0,000 | -14,050                          | 2     | ,005                  | -1,07000        | ,07616                   | -1,39768                                | -,74232  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -14,050                          | 1,355 | ,020                  | -1,07000        | ,07616                   | -1,60338                                | -,53662  |

**Tabela A14: Teste de amostras independentes massa específica (AR1).**

| Teste de amostras independentes        |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |          |  |
|--|---------------------------------|--|-------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|----------|--|
|  |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       | teste-t para Igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |          |  |
|  |                                 | F  | Sig.  | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |          |  |
|  |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          | Inferior                                | Superior |  |
| ME - Grossa AR1 e Média Grossa AR1     | Variâncias iguais assumidas     | 4062736130560550,000                         | ,000  | 0,000                            | 2     | 1,000                 | 0,00000         | ,05385                   | -,23170                                 | ,23170   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 0,000                            | 1,312 | 1,000                 | 0,00000         | ,05385                   | -,39773                                 | ,39773   |  |
| ME - Grossa AR1 e Média Fina AR1       | Variâncias iguais assumidas     | 15055810484130500,000                        | 0,000 | -2,445                           | 2     | ,134                  | -,10500         | ,04294                   | -,28976                                 | ,07976   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -2,445                           | 1,515 | ,173                  | -,10500         | ,04294                   | -,35992                                 | ,14992   |  |
| ME - Grossa AR1 e Fina AR1             | Variâncias iguais assumidas     | 5984781285220950,000                         | ,000  | -8,050                           | 2     | ,015                  | -,18000         | ,02236                   | -,27621                                 | -,08379  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -8,050                           | 1,471 | ,034                  | -,18000         | ,02236                   | -,31837                                 | -,04163  |  |
| ME - Grossa AR1 e Fracionada AR1       | Variâncias iguais assumidas     | 269315157834942000,000                       | 0,000 | -,849                            | 2     | ,485                  | -,07000         | ,08246                   | -,42481                                 | ,28481   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -,849                            | 1,125 | ,539                  | -,07000         | ,08246                   | -,87974                                 | ,73974   |  |
| ME- 'Media Grossa AR1 e Média Fina AR1 | Variâncias iguais assumidas     | 665708050448573,000                          | ,000  | -1,672                           | 2     | ,236                  | -,1050          | ,0628                    | -,3752                                  | ,1652    |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -1,672                           | 1,866 | ,245                  | -,1050          | ,0628                    | -,3947                                  | ,1847    |  |
| ME- 'Media Grossa AR1 e Fina AR1       | Variâncias iguais assumidas     | 7565006223926810,000                         | ,000  | -3,530                           | 2     | ,072                  | -,18000         | ,05099                   | -,39939                                 | ,03939   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -3,530                           | 1,080 | ,161                  | -,18000         | ,05099                   | -,72493                                 | ,36493   |  |
| ME- 'Media Grossa AR1 e FracionadaAR1  | Variâncias iguais assumidas     | 4323631571294700,000                         | ,000  | -,742                            | 2     | ,535                  | -,070000        | ,094340                  | -,475911                                | ,335911  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -,742                            | 1,678 | ,548                  | -,070000        | ,094340                  | -,560566                                | ,420566  |  |
| ME - Media Fina AR1 e Fracionada AR1   | Variâncias iguais assumidas     | 216370246124208000,000                       | 0,000 | ,395                             | 2     | ,731                  | ,03500          | ,08857                   | -,34607                                 | ,41607   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,395                             | 1,429 | ,744                  | ,03500          | ,08857                   | -,53635                                 | ,60635   |  |
| ME - Fina AR1 e Fracionada AR1         | Variâncias iguais assumidas     | 1466271414879130000,000                      | 0,000 | 1,364                            | 2     | ,306                  | ,11000          | ,08062                   | -,23689                                 | ,45689   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 1,364                            | 1,031 | ,398                  | ,11000          | ,08062                   | -,84390                                 | 1,06390  |  |

**Tabela A15: Teste de amostras independentes massa unitária (AR2).**

| Teste de amostras independentes        |                                 |  |      |                                  |       |                       |                 |                          |   |            |  |
|--|---------------------------------|--|------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|------------|--|
|  |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |      | teste-t para Igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |            |  |
|  |                                 | F  | Sig. | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |            |  |
|  |                                 |  |      |                                  |       |                       |                 |                          | Inferior                                | Superior   |  |
| MU - Grossa AR2 e Média Grossa AR2     | Variâncias iguais assumidas     |  |      | 15,743                           | 2     | ,004                  | 61,51000        | 3,90708                  | 44,69918                                | 78,32082   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 15,743                           | 1,809 | ,006                  | 61,51000        | 3,90708                  | 42,87885                                | 80,14115   |  |
| MU - Grossa AR2 e Média Fina AR2       | Variâncias iguais assumidas     |  |      | 63,599                           | 2     | ,000                  | 237,91000       | 3,74076                  | 221,81480                               | 254,00520  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 63,599                           | 1,669 | ,001                  | 237,91000       | 3,74076                  | 218,33356                               | 257,48644  |  |
| MU - Grossa AR2 e Fina AR2             | Variâncias iguais assumidas     |  |      | 57,122                           | 2     | ,000                  | 186,12000       | 3,25830                  | 172,10068                               | 200,13932  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 57,122                           | 1,099 | ,008                  | 186,12000       | 3,25830                  | 152,60017                               | 219,63983  |  |
| MU - Grossa AR2 e Fracionada AR2       | Variâncias iguais assumidas     |  |      | -20,331                          | 2     | ,002                  | -67,96000       | 3,34265                  | -82,34226                               | -53,57774  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -20,331                          | 1,208 | ,018                  | -67,96000       | 3,34265                  | -96,53420                               | -39,38580  |  |
| MU - Média Grossa AR2 e Média Fina AR2 | Variâncias iguais assumidas     |  |      | 58,690                           | 2     | ,000                  | 176,40000       | 3,00563                  | 163,46783                               | 189,33217  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 58,690                           | 1,961 | ,000                  | 176,40000       | 3,00563                  | 163,21899                               | 189,58101  |  |
| MU - Média Grossa AR2 e Fina AR2       | Variâncias iguais assumidas     |  |      | 52,391                           | 2     | ,000                  | 124,61000       | 2,37844                  | 114,37638                               | 134,84362  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 52,391                           | 1,194 | ,006                  | 124,61000       | 2,37844                  | 103,83804                               | 145,38196  |  |
| MU - Média Grossa AR2 e Fracionada AR2 | Variâncias iguais assumidas     |  |      | -51,939                          | 2     | ,000                  | -129,47000      | 2,49275                  | -140,19544                              | -118,74456 |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -51,939                          | 1,395 | ,003                  | -129,47000      | 2,49275                  | -146,15529                              | -112,78471 |  |
| ME - Média Fina AR2e Fina AR2          | Variâncias iguais assumidas     |  |      | -24,732                          | 2     | ,002                  | -51,79000       | 2,09404                  | -60,79992                               | -42,78008  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -24,732                          | 1,255 | ,012                  | -51,79000       | 2,09404                  | -68,47116                               | -35,10884  |  |
| ME - Média Fina AR2e Fracionada AR2    | Variâncias iguais assumidas     |  |      | -137,592                         | 2     | ,000                  | -305,87000      | 2,22302                  | -315,43487                              | -296,30513 |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -137,592                         | 1,509 | ,000                  | -305,87000      | 2,22302                  | -319,13749                              | -292,60251 |  |
| ME - a Fina AR2e Fracionada AR2        | Variâncias iguais assumidas     |  |      | -203,102                         | 2     | ,000                  | -254,08000      | 1,25100                  | -259,46262                              | -248,69738 |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -203,102                         | 1,775 | ,000                  | -254,08000      | 1,25100                  | -260,17128                              | -247,98872 |  |

**Tabela A16: Teste de amostras independentes absorção de água (AR2).**

| Teste de amostras independentes        |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |          |
|--|---------------------------------|--|-------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|----------|
|  |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       | teste-t para Igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |          |
|  |                                 | F  | Sig.  | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |          |
|  |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          | Inferior                                | Superior |
| AB - Grossa AR2 e Média Grossa AR2     | Variâncias iguais assumidas     | 3073540219359240000,000                      | 0,000 | -39,315                          | 2     | ,001                  | -2,78000        | ,07071                   | -3,08424                                | -2,47576 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -39,315                          | 1,041 | ,014                  | -2,78000        | ,07071                   | -3,59936                                | -1,96064 |
| AB - Grossa AR2 e Média Fina AR2       | Variâncias iguais assumidas     | 6878276169860370,000                         | ,000  | -115,381                         | 2     | ,000                  | -2,58000        | ,02236                   | -2,67621                                | -2,48379 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -115,381                         | 1,471 | ,001                  | -2,58000        | ,02236                   | -2,71837                                | -2,44163 |
| AB - Grossa AR2 e Fina AR2             | Variâncias iguais assumidas     | 8138653873012610,000                         | ,000  | -30,479                          | 2     | ,001                  | -2,76000        | ,09055                   | -3,14962                                | -2,37038 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -30,479                          | 1,025 | ,019                  | -2,76000        | ,09055                   | -3,84711                                | -1,67289 |
| AB - Grossa AR2 e Fracionada AR2       | Variâncias iguais assumidas     | ,000   | 1,000 | -126,572                         | 2     | ,000                  | -1,79000        | ,01414                   | -1,85085                                | -1,72915 |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -126,572                         | 2,000 | ,000                  | -1,79000        | ,01414                   | -1,85085                                | -1,72915 |
| AB - Média Grossa AR2 e Média Fina AR2 | Variâncias iguais assumidas     | 187024415163154000,000                       | 0,000 | 2,747                            | 2     | ,111                  | ,20000          | ,07280                   | -,11324                                 | ,51324   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 2,747                            | 1,162 | ,193                  | ,20000          | ,07280                   | -,46941                                 | ,86941   |
| AB - Média Grossa AR2 e Fina AR2       | Variâncias iguais assumidas     | 509424647558754,000                          | ,000  | ,175                             | 2     | ,877                  | ,02000          | ,11402                   | -,47058                                 | ,51058   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,175                             | 1,886 | ,878                  | ,02000          | ,11402                   | -,50019                                 | ,54019   |
| AB - Média Grossa AR2 e Fracionada AR2 | Variâncias iguais assumidas     | 1077260631339770000,000                      | 0,000 | 14,001                           | 2     | ,005                  | ,99000          | ,07071                   | ,68576                                  | 1,29424  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 14,001                           | 1,041 | ,041                  | ,99000          | ,07071                   | ,17064                                  | 1,80936  |
| AB - Média Fina AR2 e Fina AR2         | Variâncias iguais assumidas     | 6135992778298600,000                         | ,000  | -1,952                           | 2     | ,190                  | -,18000         | ,09220                   | -,57668                                 | ,21668   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -1,952                           | 1,099 | ,284                  | -,18000         | ,09220                   | -1,13014                                | ,77014   |
| AB - Média Fina AR2 e Fracionada AR2   | Variâncias iguais assumidas     | 5984781285220950,000                         | ,000  | 35,330                           | 2     | ,001                  | ,79000          | ,02236                   | ,69379                                  | ,88621   |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 35,330                           | 1,471 | ,004                  | ,79000          | ,02236                   | ,65163                                  | ,92837   |
| AB - Fina AR2 e Fracionada AR2         | Variâncias iguais assumidas     | 8116251589796200,000                         | ,000  | 10,712                           | 2     | ,009                  | ,97000          | ,09055                   | ,58038                                  | 1,35962  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 10,712                           | 1,025 | ,056                  | ,97000          | ,09055                   | -,11711                                 | 2,05711  |



**Tabela A17: Teste de amostras independentes massa específica (AR2).**

| Teste de amostras independentes        |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          |   |          |  |
|--|---------------------------------|--|-------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|----------|--|
|  |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |       | teste-t para Igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |          |  |
|  |                                 | F  | Sig.  | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |          |  |
|  |                                 |  |       |                                  |       |                       |                 |                          | Inferior                                | Superior |  |
| ME - Grossa AR2 e Média Grossa AR2     | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 2,341                            | 2     | ,144                  | ,44500          | ,19007                   | -3,7279                                 | 1,26279  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 2,341                            | 1,471 | ,188                  | ,44500          | ,19007                   | -,73115                                 | 1,62115  |  |
| ME - Grossa AR2 e Média Fina AR2       | Variâncias iguais assumidas     | 52704983067741200,000                        | 0,000 | 6,007                            | 2     | ,027                  | ,62500          | ,10404                   | ,17734                                  | 1,07266  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 6,007                            | 1,798 | ,034                  | ,62500          | ,10404                   | ,12562                                  | 1,12438  |  |
| ME - Grossa AR2 e Fina AR2             | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 8,894                            | 2     | ,012                  | ,82100          | ,09231                   | ,42383                                  | 1,21817  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 8,894                            | 1,348 | ,037                  | ,82100          | ,09231                   | ,16849                                  | 1,47351  |  |
| ME - Grossa AR2 e Fracionada AR2       | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 3,045                            | 2     | ,093                  | ,52500          | ,17241                   | -,21682                                 | 1,26682  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 3,045                            | 1,582 | ,123                  | ,52500          | ,17241                   | -,44012                                 | 1,49012  |  |
| ME - Media Grossa AR2 e Média Fina AR2 | Variâncias iguais assumidas     | 1020368472191480000,000                      | 0,000 | ,998                             | 2     | ,423                  | ,18000          | ,18028                   | -,59567                                 | ,95567   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,998                             | 1,245 | ,473                  | ,18000          | ,18028                   | -,127695                                | 1,63695  |  |
| ME - Media Grossa AR2 e Fina AR2       | Variâncias iguais assumidas     |  |       | 2,164                            | 2     | ,163                  | ,37600          | ,17377                   | -,37167                                 | 1,12367  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 2,164                            | 1,090 | ,259                  | ,37600          | ,17377                   | -,144623                                | 2,19823  |  |
| ME - Media Grossa AR2 e Fracionada AR2 | Variâncias iguais assumidas     |  |       | ,353                             | 2     | ,758                  | ,08000          | ,22672                   | -,89548                                 | 1,05548  |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | ,353                             | 1,969 | ,758                  | ,08000          | ,22672                   | -,91012                                 | 1,07012  |  |
| ME - Media Fina AR2 e Fina AR2         | Variâncias iguais assumidas     | 48572912395230700,000                        | 0,000 | 2,801                            | 2     | ,107                  | ,19600          | ,06997                   | -,10506                                 | ,49706   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | 2,801                            | 1,637 | ,133                  | ,19600          | ,06997                   | -,17891                                 | ,57091   |  |
| ME - Media Fina AR2 e Fracionada AR2   | Variâncias iguais assumidas     | 683056580557930000,000                       | 0,000 | -,619                            | 2     | ,599                  | -,10000         | ,16155                   | -,79511                                 | ,59511   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -,619                            | 1,312 | ,626                  | -,10000         | ,16155                   | -,129318                                | 1,09318  |  |
| ME - Fina AR2 e Fracionada AR2         | Variâncias iguais assumidas     |  |       | -1,919                           | 2     | ,195                  | -,29600         | ,15426                   | -,95973                                 | ,36773   |  |
|  | Variâncias iguais não assumidas |  |       | -1,919                           | 1,115 | ,286                  | -,29600         | ,15426                   | -,183784                                | 1,24584  |  |

**Tabela A18: Resumo dos resultados estatísticos dos ensaios de Massa Unitária das areias AR1 e AR2.**

| <b>Médias das Massas Unitárias</b> |                   |                   |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Combinações das Frações</b>     | <b>AR1/AR1</b>    | <b>AR2/AR2</b>    |
| Grossa/Média Grossa                | significativo     | significativo     |
| Grossa/Média fina                  | significativo     | significativo     |
| Grossa/Fina                        | significativo     | significativo     |
| Grossa/ Areia composta             | significativo     | significativo     |
| Média grossa/Média fina            | significativo     | significativo     |
| Média grossa/Fina                  | significativo     | significativo     |
| Média grossa/Areia composta        | significativo     | significativo     |
| Média Fina/Fina                    | não significativo | significativo     |
| Média Fina/ Areia composta         | significativo     | não significativo |
| Fina/ Areia composta               | significativo     | significativo     |

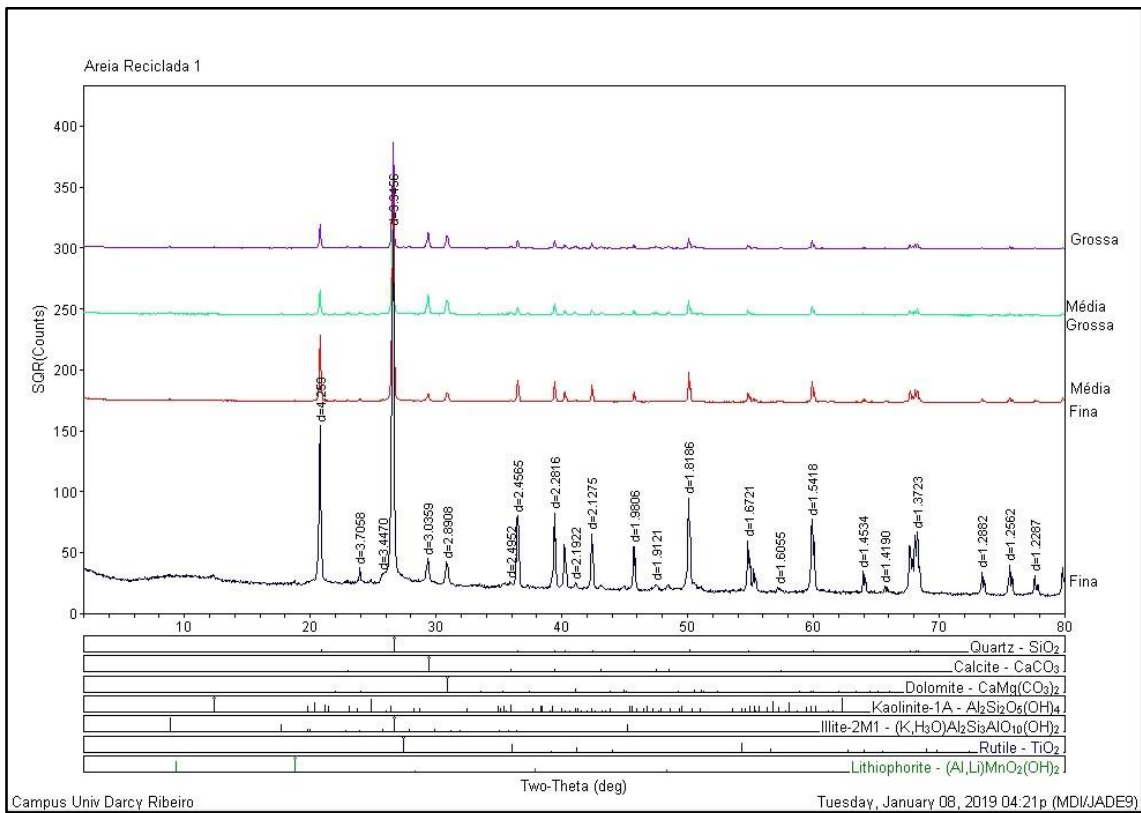
**Tabela A19: Resumo dos resultados estatísticos dos ensaios de: Massa Específica e Absorção de Água, das areias AR1 e AR2.**

| <b>Médias das Absorções de Água</b> |                   |                   |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Combinações das Frações</b>      | <b>AR1/AR1</b>    | <b>AR2/AR2</b>    |
| Grossa/Média Grossa                 | não significativo | significativo     |
| Grossa/Média fina                   | não significativo | significativo     |
| Grossa/Fina                         | significativo     | significativo     |
| Grossa/ Areia composta              | significativo     | significativo     |
| Média grossa/Média fina             | não comparáveis   | não significativo |
| Média grossa/Fina                   | significativo     | não significativo |
| Média grossa/ Areia composta        | significativo     | significativo     |
| Média Fina/Fina                     | não significativo | não significativo |
| Média Fina/ Areia composta          | não significativo | não significativo |
| Fina/ Areia composta                | significativo     | não significativo |
| <b>Massa Específica</b>             |                   |                   |
| <b>Combinações das Frações</b>      | <b>AR1/AR1</b>    | <b>AR2/AR2</b>    |
| Grossa/Média Grossa                 | não significativo | não significativo |
| Grossa/Média fina                   | significativo     | não significativo |
| Grossa/Fina                         | significativo     | significativo     |
| Grossa/ Areia composta              | não significativo | não significativo |
| Média grossa/Média fina             | não significativo | não significativo |
| Média grossa/Fina                   | significativo     | significativo     |
| Média grossa/ Areia composta        | não significativo | não significativo |
| Média Fina/Fina                     | não significativo | não significativo |
| Média Fina/ Areia composta          | não significativo | não significativo |
| Fina/ Areia composta                | não significativo | não significativo |

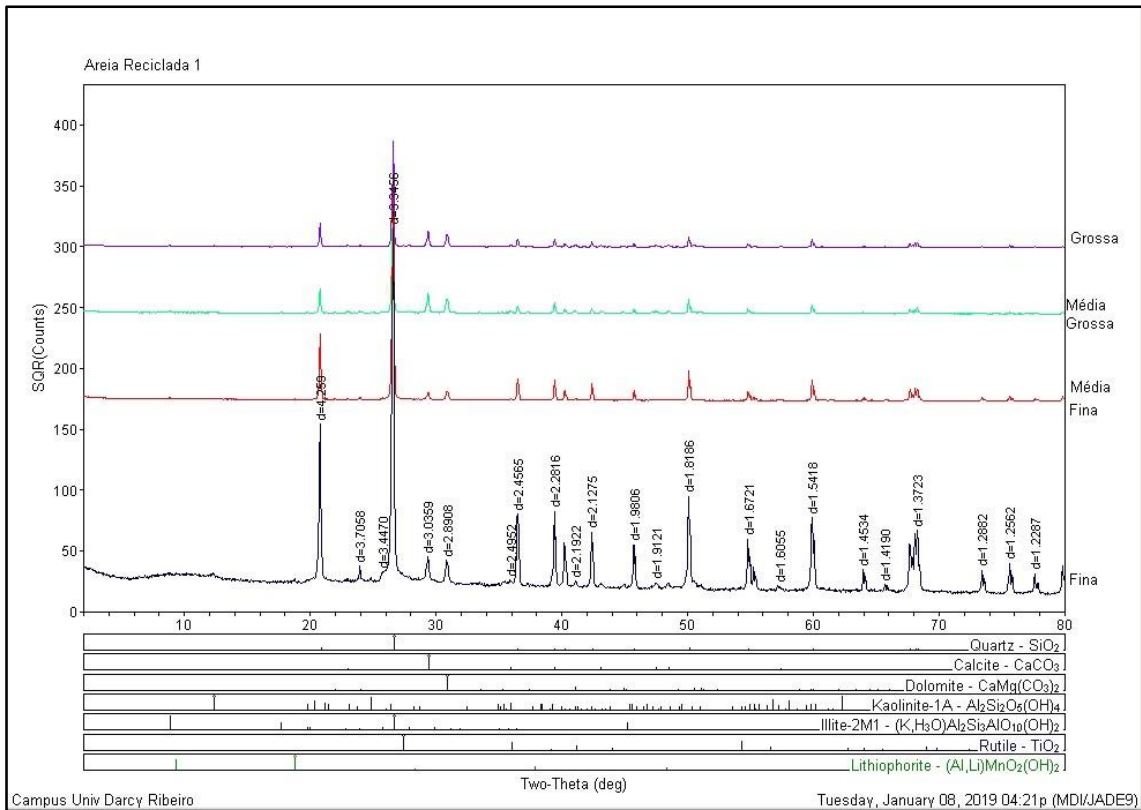
**Tabela A20: Resumo dos resultados estatísticos dos ensaios de: Massa Unitária, Massa Específica e Absorção de Água, das areias AR1 e AR2.**

| <b>Médias das Massas Unitárias</b>   |                   |                   |                   |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Frações granulométricas</b>       | <b>AN/AR1</b>     | <b>AN/AR2</b>     | <b>AR1/AR2</b>    |
| Grossa                               | significativo     | significativo     | não significativo |
| Média Grossa                         | significativo     | significativo     | não significativo |
| Média Fina                           | significativo     | significativo     | significativo     |
| Fina                                 | não significativo | significativo     | significativo     |
| Areia composta                       | significativo     | significativo     | significativo     |
| <b>Médias das Absorções de Água</b>  |                   |                   |                   |
| <b>Frações granulométricas</b>       | <b>AN/AR1</b>     | <b>AN/AR2</b>     | <b>AR1/AR2</b>    |
| Grossa                               | significativo     | significativo     | significativo     |
| Média Grossa                         | significativo     | significativo     | significativo     |
| Média Fina                           | não significativo | significativo     | não significativo |
| Fina                                 | significativo     | significativo     | significativo     |
| Areia composta                       | significativo     | significativo     | não significativo |
| <b>Médias das Massas Específicas</b> |                   |                   |                   |
| <b>Frações granulométricas</b>       | <b>AN/AR1</b>     | <b>AN/AR2</b>     | <b>AR1/AR2</b>    |
| Grossa                               | significativo     | não significativo | significativo     |
| Média Grossa                         | significativo     | não significativo | significativo     |
| Média Fina                           | significativo     | não significativo | não significativo |
| Fina                                 | não significativo | não significativo | não significativo |
| Areia composta                       | não significativo | não significativo | significativo     |

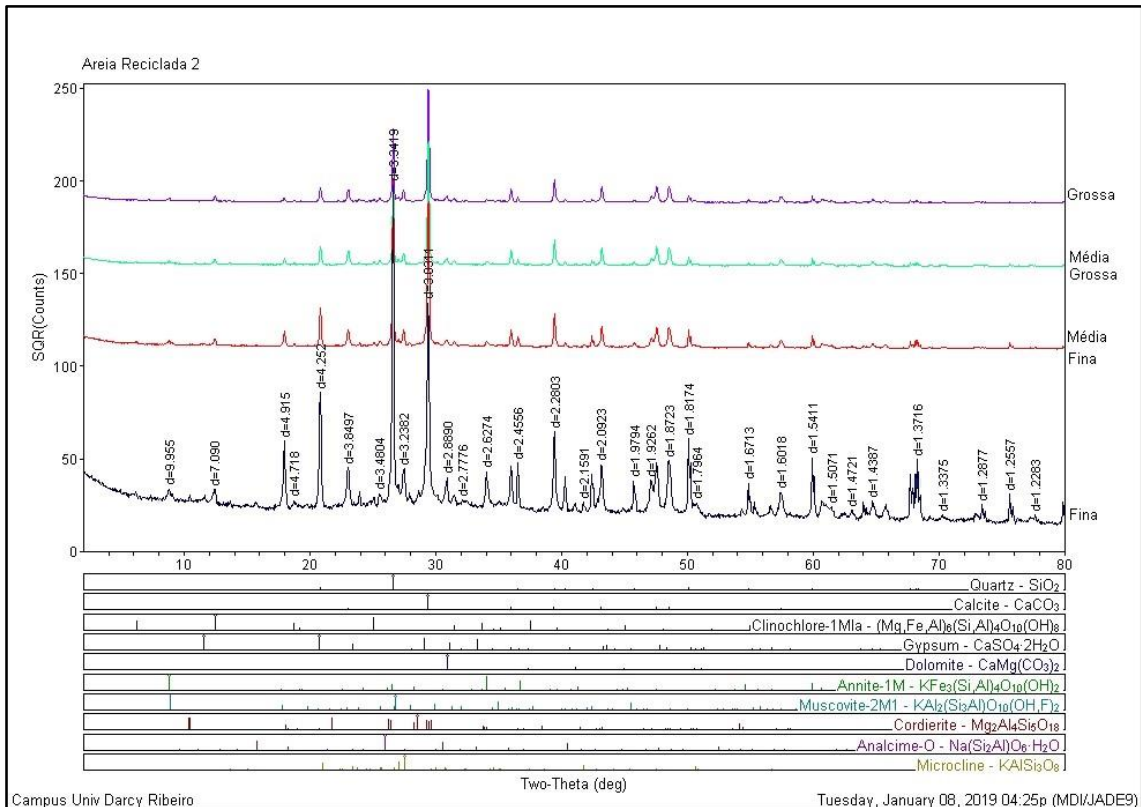
## APÊNDICE B – DIFRATOGRAMAS E ELEMENTOS QUÍMICOS DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS



**Figura B1: Difratoogramas das frações granulométricas da areia de referência**



**Figura B2: Difratomogramas das frações granulométricas da areia AR1**



**Figura B3: Difratomogramas das frações granulométricas da areia AR**

**Tabela B1: Resultados do ensaio de FRX, das frações granulométricas da areia AN.**

| Óxidos (%)                     | Fração Grossa | Fração M. Grossa | Fração Média Fina | Fração Fina |
|--------------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 94,610        | 96,226           | 94,788            | 86,051      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,193         | 4,355            | 3,625             | 8,242       |
| K <sub>2</sub> O               | 0,574         | 1,732            | 0,789             | 3,781       |
| SO <sub>3</sub>                | 0,268         | 0,348            | 0,284             | -           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,203         | 0,109            | 0,157             | 0,684       |
| CaO                            | 0,106         | 0,118            | 0,135             | -           |
| Cs <sub>2</sub> O              | -             | 0,081            | -                 | 0,076       |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,031         | -                | 0,123             | 0,846       |
| WO <sub>3</sub>                | 0,009         | -                | -                 | -           |
| ZnO                            | 0,006         | 0,006            | 0,006             | -           |
| GeO <sub>2</sub>               | -             | 0,009            | 0,008             | -           |
| CuO                            | -             | 0,006            | 0,006             | -           |
| Rb <sub>2</sub> O              | -             | 0,005            | -                 | 0,012       |
| SrO                            | -             | 0,004            | -                 | 0,009       |
| BaO                            | -             | -                | 0,080             | -           |
| ZrO <sub>2</sub>               | -             | -                | -                 | 0,248       |
| MnO                            | -             | -                | -                 | 0,034       |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | -             | -                | -                 | 0,016       |
| NbO                            | -             | -                | -                 | 0,002       |

**Tabela B2: Resultados do ensaio de FRX das frações granulométricas da areia AR1.**

| Óxidos (%)                     | Fração Grossa | Fração M. Grossa | Fração Média Fina | Fração Fina |
|--------------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 52,485        | 52,910           | 82,004            | 87,671      |
| CaO                            | 29,941        | 29,571           | 9,719             | 5,128       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6,673         | 6,615            | 4,198             | 4,321       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,322         | 4,472            | 1,505             | 1,205       |
| MgO                            | 4,257         | 4,344            | 1,560             | 0,781       |
| K <sub>2</sub> O               | 1,008         | 0,968            | 0,348             | 0,230       |
| SO <sub>3</sub>                | 0,547         | 0,519            | 0,368             | 0,426       |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,435         | 0,384            | 0,148             | 0,173       |
| MnO                            | 0,126         | 0,074            | 0,021             | 0,022       |
| SrO                            | 0,093         | 0,095            | 0,027             | 0,015       |
| BaO                            | 0,070         | -                | -                 | -           |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0,023         | 0,023            | -                 | -           |
| ZnO                            | 0,012         | 0,009            | 0,008             | 0,007       |
| Rb <sub>2</sub> O              | 0,007         | -                | -                 | -           |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | -             | 0,018            | 0,020             | 0,020       |
| Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -             | -                | 0,075             | -           |

**Tabela B3: Resultados do ensaio de FRX das frações granulométricas da areia AR2.**

| Óxidos (%)                     | Fração Grossa | Fração M. Grossa | Fração Média Fina | Fração Fina |
|--------------------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------|
| CaO                            | 58,652        | 57,235           | 52,945            | 48,513      |
| SiO <sub>2</sub>               | 26,272        | 27,941           | 33,231            | 38,458      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,904         | 5,586            | 5,283             | 5,028       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,307         | 3,354            | 3,084             | 2,839       |
| K <sub>2</sub> O               | 2,919         | 2,695            | 2,257             | 1,739       |
| MgO                            | 1,846         | 1,772            | 1,669             | 1,500       |
| SrO                            | 0,066         | 0,079            | 0,094             | 0,113       |
| SO <sub>3</sub>                | 0,571         | 0,657            | 1,055             | 1,480       |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,358         | 0,323            | 0,324             | 0,269       |
| MnO                            | 0,047         | 0,045            | 0,050             | 0,048       |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0,027         | -                | -                 | -           |
| Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -             | 0,304            | -                 | -           |
| Rb <sub>2</sub> O              | -             | 0,010            | 0,009             | -           |
| CuO                            | -             | -                | -                 | 0,013       |

## APÊNDICE C –ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS

**Tabela C1: Testes de amostras independentes para Resistências à Compressão aos 28 dias**

|   |                                 | Teste de amostras independentes              |      |        |       |                                  |                 |                          |   |          |  |
|---|---------------------------------|--|------|--------|-------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|---|----------|--|
|   |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |      |        |       | teste-t para igualdade de Médias |                 |                          |   |          |  |
|   |                                 | F  | Sig. | t      | df    | Sig. (2 extremidades)            | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |          |  |
|   |                                 |  |      |        |       |                                  |                 | Inferior                 | Superior                                |          |  |
| Resistencia Compressao grossa _AR1-Referencia         | Variâncias iguais assumidas     | 1,208  | ,314 | 3,188  | 6     | ,019                             | 8,60000         | 2,69776                  | 1,99882                                 | 15,20118 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 3,188  | 3,780 | ,036                             | 8,60000         | 2,69776                  | ,93506                                  | 16,26494 |  |
| Resistencia Compressao media grossa _AR1-Referencia   | Variâncias iguais assumidas     | 2,236  | ,185 | 3,060  | 6     | ,022                             | 7,52500         | 2,45929                  | 1,50733                                 | 13,54267 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 3,060  | 3,956 | ,038                             | 7,52500         | 2,45929                  | ,66709                                  | 14,38291 |  |
| Resistencia Compressao media fina _AR1-Referencia     | Variâncias iguais assumidas     | 5,831  | ,052 | ,867   | 6     | ,419                             | 5,10000         | 5,88257                  | -9,29412                                | 19,49412 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | ,867   | 3,151 | ,447                             | 5,10000         | 5,88257                  | -13,12318                               | 23,32318 |  |
| Resistencia Compressao fina _AR1-Referencia           | Variâncias iguais assumidas     | 16,334                                       | ,007 | ,147   | 6     | ,888                             | ,40000          | 2,71623                  | -6,24638                                | 7,04638  |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | ,147   | 3,769 | ,890                             | ,40000          | 2,71623                  | -7,32743                                | 8,12743  |  |
| Resistencia Compressao Fracionada _AR1-Referencia     | Variâncias iguais assumidas     | 2,314  | ,179 | 2,017  | 6     | ,090                             | 7,10000         | 3,52083                  | -1,51516                                | 15,71516 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 2,017  | 3,440 | ,125                             | 7,10000         | 3,52083                  | -3,33662                                | 17,53662 |  |
| Resistencia Compressao Fracionada 25 _AR1-Referencia  | Variâncias iguais assumidas     | 2,484  | ,166 | -,604  | 6     | ,568                             | -2,10000        | 3,47533                  | -10,60383                               | 6,40383  |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -,604  | 3,452 | ,583                             | -2,10000        | 3,47533                  | -12,38427                               | 8,18427  |  |
| Resistencia Compressao grossa _AR2-Referencia         | Variâncias iguais assumidas     | 2,645  | ,155 | 2,264  | 6     | ,064                             | 6,15000         | 2,71593                  | -,49563                                 | 12,79563 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 2,264  | 3,769 | ,090                             | 6,15000         | 2,71593                  | -1,57639                                | 13,87639 |  |
| Resistencia Compressao media grossa _AR2-Referencia   | Variâncias iguais assumidas     | 1,168  | ,321 | 3,589  | 6     | ,012                             | 7,62500         | 2,12441                  | 2,42675                                 | 12,82325 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 3,589  | 4,322 | ,020                             | 7,62500         | 2,12441                  | 1,89611                                 | 13,35389 |  |
| Resistencia Compressao media fina _AR2-Referencia     | Variâncias iguais assumidas     | 3,079  | ,130 | -1,183 | 6     | ,281                             | -3,87500        | 3,27436                  | -11,88708                               | 4,13708  |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -1,183 | 3,513 | ,310                             | -3,87500        | 3,27436                  | -13,48505                               | 5,73505  |  |
| Resistencia Compressao fina _AR2-Referencia           | Variâncias iguais assumidas     | 1,913  | ,216 | 1,547  | 6     | ,173                             | 3,25000         | 2,10069                  | -1,89021                                | 8,39021  |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,547  | 4,355 | ,191                             | 3,25000         | 2,10069                  | -2,39946                                | 8,89946  |  |
| Resistencia Compressao Fracionada _AR2-Referencia     | Variâncias iguais assumidas     | 4,530  | ,077 | 9,962  | 6     | ,000                             | 17,82500        | 1,78926                  | 13,44683                                | 22,20317 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 9,962  | 4,920 | ,000                             | 17,82500        | 1,78926                  | 13,20288                                | 22,44712 |  |
| Resistencia Compressao Fracionada 25% _AR2-Referencia | Variâncias iguais assumidas     | 5,358  | ,060 | 1,210  | 6     | ,272                             | 2,75000         | 2,27331                  | -2,81258                                | 8,31258  |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,210  | 4,138 | ,291                             | 2,75000         | 2,27331                  | -3,47956                                | 8,97956  |  |
| Resistencia Compressao grossa AR1_AR2                 | Variâncias iguais assumidas     | ,043   | ,843 | -,681  | 6     | ,521                             | -2,45000        | 3,59902                  | -11,25648                               | 6,35648  |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -,681  | 6,000 | ,521                             | -2,45000        | 3,59902                  | -11,25660                               | 6,35660  |  |
| Resistencia Compressao media grossa AR1_AR2           | Variâncias iguais assumidas     | ,151   | ,711 | ,034   | 6     | ,974                             | ,10000          | 2,97658                  | -7,18342                                | 7,38342  |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | ,034   | 5,825 | ,974                             | ,10000          | 2,97658                  | -7,23674                                | 7,43674  |  |
| Resistencia Compressao media fina AR1_AR2             | Variâncias iguais assumidas     | 1,418  | ,279 | -1,359 | 6     | ,223                             | -8,97500        | 6,60491                  | -25,13662                               | 7,18662  |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -1,359 | 4,616 | ,237                             | -8,97500        | 6,60491                  | -26,38673                               | 8,43673  |  |
| Resistencia Compressao fina AR1_AR2                   | Variâncias iguais assumidas     | 1,884  | ,219 | ,897   | 6     | ,404                             | 2,85000         | 3,17641                  | -4,92240                                | 10,62240 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | ,897   | 5,523 | ,407                             | 2,85000         | 3,17641                  | -5,08804                                | 10,78804 |  |
| Resistencia Compressao Fracionada AR1_AR2             | Variâncias iguais assumidas     | ,909   | ,377 | 2,877  | 6     | ,028                             | 10,72500        | 3,72780                  | 1,60341                                 | 19,84659 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 2,877  | 4,173 | ,043                             | 10,72500        | 3,72780                  | ,54206                                  | 20,90794 |  |
| Resistencia Compressao Fracionada 25% AR1_AR2         | Variâncias iguais assumidas     | ,338   | ,582 | 1,230  | 6     | ,265                             | 4,85000         | 3,94266                  | -4,79735                                | 14,49735 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,230  | 5,010 | ,273                             | 4,85000         | 3,94266                  | -5,27885                                | 14,97885 |  |

**Tabela C2: Resumo dos resultados dos testes estatísticos para os parâmetros: Resistência à compressão e Resistência à Tração das argamassas  $ARG_{AN}$ ,  $ARG_{AR1}$  e  $ARG_{AR2}$ .**

| <b>Médias das Resistências à Compressão</b> |  |  |   |
|---|--|--|---|
| <b>Argamassas</b>                           | <b><math>ARG_{AN}/ARG_{AR1}</math></b> | <b><math>ARG_{AN}/ARG_{AR2}</math></b> | <b><math>ARG_{AR1}/ARG_{AR2}</math></b> |
| Grossa                                      | significativo                          | não significativo                      | significativo                           |
| Média Grossa                                | significativo                          | significativo                          | não significativo                       |
| Média Fina                                  | não significativo                      | não significativo                      | não significativo                       |
| Fina  | não significativo                      | não significativo                      | não significativo                       |
| Areia Composta                              | significativo                          | significativo                          | significativo                           |
| Areia Composta 25%                          | não significativo                      | não significativo                      | não significativo                       |
| <b>Médias das Resistências à Tração</b>     |  |  |   |
| <b>Argamassas</b>                           | <b><math>ARG_{AN}/ARG_{AR1}</math></b> | <b><math>ARG_{AN}/ARG_{AR2}</math></b> | <b><math>ARG_{AR1}/ARG_{AR2}</math></b> |
| Grossa                                      | não significativo                      | não significativo                      | não significativo                       |
| Média Grossa                                | não significativo                      | não significativo                      | não significativo                       |
| Média Fina                                  | não significativo                      | não significativo                      | não significativo                       |
| Fina  | não significativo                      | não significativo                      | não significativo                       |
| Areia Composta                              | não significativo                      | não significativo                      | não significativo                       |
| Areia Composta 25%                          | significativo                          | não significativo                      | significativo                           |



## APÊNDICE D – MASSAS INTERMEDIÁRIAS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

**Tabela D1: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| NOME DA AMOSTRA: ARG <sub>AN</sub> |                       |                        |                       |                        |                        |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Massa (g)                          | Aos 28 dias           | Após 24 h na estufa    | Após 48h na estufa    | Após 72h na estufa     | Após 24h amostra (SSS) |
| Data                               | 13/11/2017            | 14/11/2017             | 15/11/2017            | 16/11/2017             | 17/11/2017             |
| Amostra 1                          | 452,95                | 421,89                 | 419,56                | 419,22                 | 449,76                 |
| Amostra 2                          | 455,88                | 425,91                 | 423,9                 | 423,6                  | 453,45                 |
| Amostra 3                          | 439,5                 | 406,99                 | 405,49                | 405,34                 | 436,75                 |
| Massa (g)                          | Após 24h Hidrostática | Após 48h amostra (SSS) | Após 48h Hidrostática | Após 72h amostra (SSS) | Após 72h Hidrostática  |
| Data                               | 17/11/2017            | 18/11/2017             | 18/11/2017            | 19/11/2017             | 19/11/2017             |
| Amostra 1                          | 250,51                | 450,58                 | 250,91                | 450,64                 | 251,05                 |
| Amostra 2                          | 253,13                | 454,31                 | 253,56                | 454,3                  | 253,62                 |
| Amostra 3                          | 242,97                | 437,52                 | 243,49                | 437,59                 | 243,6                  |

**Tabela D2: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| NOME DA AMOSTRA: ARG <sub>ARIAC</sub> |                       |                        |                       |                        |                        |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Massa (g)                             | Aos 28 dias           | Após 24 h na estufa    | Após 48h na estufa    | Após 72h na estufa     | Após 24h amostra (SSS) |
| Data                                  | 20/11/2017            | 21/11/2017             | 22/11/2017            | 23/11/2017             | 24/11/2017             |
| Amostra 1                             | 434                   | 397,52                 | 394,45                | 393,98                 | 430,56                 |
| Amostra 2                             | 440,94                | 403,98                 | 400,54                | 400,02                 | 437,52                 |
| Amostra 3                             | 437,44                | 398,8                  | 396,52                | 396,18                 | 433,86                 |
| Massa (g)                             | Após 24h Hidrostática | Após 48h amostra (SSS) | Após 48h Hidrostática | Após 72h amostra (SSS) | Após 72h Hidrostática  |
| Data                                  | 24/11/2017            | 25/11/2017             | 25/11/2017            | 26/11/2017             | 26/11/2017             |
| Amostra 1                             | 287,8                 | 430,78                 | 296,33                | 430,94                 | 290,86                 |
| Amostra 2                             | 301,62                | 437,72                 | 301,9                 | 437,91                 | 303,25                 |
| Amostra 3                             | 296,62                | 434,03                 | 298,5                 | 434,23                 | 288,51                 |

**Tabela D3: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| NOME DA AMOSTRA: ARG <sub>AR2AC</sub> |                       |                        |                       |                        |                        |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Massa (g)                             | Aos 28 dias           | Após 24 h na estufa    | Após 48h na estufa    | Após 72h na estufa     | Após 24h amostra (SSS) |
| Data                                  | 21/11/2017            | 22/11/2017             | 23/11/2017            | 24/11/2017             | 25/11/2017             |
| Amostra 1                             | 419,25                | 372,12                 | 371,4                 | 371,46                 | 412,38                 |
| Amostra 2                             | 427,3                 | 385,74                 | 383,56                | 383,3                  | 422,7                  |
| Amostra 3                             | 422,3                 | 377,87                 | 376,77                | 376,69                 | 417,16                 |
| Massa (g)                             | Após 24h Hidrostática | Após 48h amostra (SSS) | Após 48h Hidrostática | Após 72h amostra (SSS) | Após 72h Hidrostática  |
| Data                                  | 25/11/2017            | 26/11/2017             | 26/11/2017            | 27/11/2017             | 27/11/2017             |
| Amostra 1                             | 276,67                | 412,92                 | 278,31                | 413,1                  | 270,9                  |
| Amostra 2                             | 287,21                | 423,13                 | 288,31                | 423,43                 | 281,45                 |
| Amostra 3                             | 282,62                | 417,55                 | 281,87                | 417,94                 | 277,61                 |

**Tabela D4: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| <b>NOME DA AMOSTRA: ARG<sub>AR1G</sub></b> |                              |                               |                              |                               |                               |
|--|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Massa (g)                                  | <b>Aos 28 dias</b>           | <b>Após 24 h na estufa</b>    | <b>Após 48h na estufa</b>    | <b>Após 72h na estufa</b>     | <b>Após 24h amostra (SSS)</b> |
| Data                                       | 24/11/2017                   | 25/11/2017                    | 26/11/2017                   | 27/11/2017                    | 28/11/2017                    |
| Amostra 1                                  | 437,77                       | 405,27                        | 401,47                       | 401,47                        | 434,64                        |
| Amostra 2                                  | 453                          | 422,23                        | 418,25                       | 418,22                        | 450,51                        |
| Amostra 3                                  | 443,05                       | 409,85                        | 406,95                       | 407,06                        | 439,22                        |
| Massa (g)                                  | <b>Após 24h Hidrostática</b> | <b>Após 48h amostra (SSS)</b> | <b>Após 48h Hidrostática</b> | <b>Após 72h amostra (SSS)</b> | <b>Após 72h Hidrostática</b>  |
| Data                                       | 28/11/2017                   | 29/11/2017                    | 29/11/2017                   | 30/11/2017                    | 30/11/2017                    |
| Amostra 1                                  | 296,4                        | 434,88                        | 298,36                       | 435,11                        | 299,31                        |
| Amostra 2                                  | 211,9                        | 450,78                        | 209,96                       | 450,87                        | 211,62                        |
| Amostra 3                                  | 201,53                       | 439,52                        | 200,41                       | 439,78                        | 203,4                         |

**Tabela D5: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| <b>NOME DA AMOSTRA: ARG<sub>AR2G</sub></b> |                              |                               |                              |                               |                               |
|--|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Massa (g)                                  | <b>Aos 28 dias</b>           | <b>Após 24 h na estufa</b>    | <b>Após 48h na estufa</b>    | <b>Após 72h na estufa</b>     | <b>Após 24h amostra (SSS)</b> |
| Data                                       | 28/11/2017                   | 29/11/2017                    | 30/11/2017                   | 01/12/2017                    | 02/12/2017                    |
| Amostra 1                                  | 453,84                       | 422,61                        | 419,19                       | 451,23                        | 317,4                         |
| Amostra 2                                  | 444,7                        | 413,45                        | 409,95                       | 409,98                        | 441,46                        |
| Amostra 3                                  | 441,02                       | 408,98                        | 406,01                       | 406,11                        | 437,96                        |
| Massa (g)                                  | <b>Após 24h Hidrostática</b> | <b>Após 48h amostra (SSS)</b> | <b>Após 48h Hidrostática</b> | <b>Após 72h amostra (SSS)</b> | <b>Após 72h Hidrostática</b>  |
| Data                                       | 02/12/2017                   | 03/12/2017                    | 03/12/2017                   | 04/12/2017                    | 04/12/2017                    |
| Amostra 1                                  |                              | –                             | –                            | 451,49                        | 253,48                        |
| Amostra 2                                  | 313,86                       | –                             | –                            | 441,78                        | 247,42                        |
| Amostra 3                                  | 304,77                       | –                             | –                            | 438,42                        | 244,72                        |

**Tabela D6: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| <b>NOME DA AMOSTRA: ARG<sub>AR1MG</sub></b> |                              |                               |                              |                               |                               |
|---|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Massa (g)                                   | <b>Aos 28 dias</b>           | <b>Após 24 h na estufa</b>    | <b>Após 48h na estufa</b>    | <b>Após 72h na estufa</b>     | <b>Após 24h amostra (SSS)</b> |
| Data  | 09/01/2018                   | 10/01/2018                    | 11/01/2018                   | 12/01/2018                    | 13/01/2018                    |
| Amostra 1                                   | 441,68                       | 408,72                        | 405                          | 404,38                        | 438,16                        |
| Amostra 2                                   | 442,38                       | 410,19                        | 406,24                       | 405,56                        | 438,68                        |
| Amostra 3                                   | 441,44                       | 406,75                        | 403,41                       | 402,87                        | 437,73                        |
| Massa (g)                                   | <b>Após 24h Hidrostática</b> | <b>Após 48h amostra (SSS)</b> | <b>Após 48h Hidrostática</b> | <b>Após 72h amostra (SSS)</b> | <b>Após 72h Hidrostática</b>  |
| Data  | 13/01/2018                   | 14/01/2018                    | 14/01/2018                   | 15/01/2018                    | 15/01/2018                    |
| Amostra 1                                   | 245,9                        | 438,46                        | 246,04                       | 438,51                        | 246,12                        |
| Amostra 2                                   | 246,56                       | 438,85                        | 246,67                       | 439,02                        | 246,76                        |
| Amostra 3                                   | 244,83                       | 437,92                        | 244,95                       | 438,04                        | 244,99                        |

**Tabela D7: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| <b>NOME DA AMOSTRA: ARG<sub>AR2MG</sub></b> |                              |                               |                              |                               |                               |
|---|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Massa (g)                                   | <b>Aos 28 dias</b>           | <b>Após 24 h na estufa</b>    | <b>Após 48h na estufa</b>    | <b>Após 72h na estufa</b>     | <b>Após 24h amostra (SSS)</b> |
| Data  | 04/12/2017                   | 05/12/2017                    | 06/12/2017                   | 07/12/2017                    | 08/12/2017                    |
| Amostra 1                                   | 437,79                       | 408,54                        | 401,93                       | 401,09                        | 430,48                        |
| Amostra 2                                   | 439,02                       | 407,79                        | 402,27                       | 401,8                         | 434,96                        |
| Amostra 3                                   | 443,9                        | 414                           | 407,65                       | 407,02                        | 438,46                        |
| Massa (g)                                   | <b>Após 24h Hidrostática</b> | <b>Após 48h amostra (SSS)</b> | <b>Após 48h Hidrostática</b> | <b>Após 72h amostra (SSS)</b> | <b>Após 72h Hidrostática</b>  |
| Data  | 08/12/2017                   | 09/12/2017                    | 09/12/2017                   | 10/12/2017                    | 10/12/2017                    |
| Amostra 1                                   | 239,08                       | 431,07                        | 237                          | 431,53                        | 237,45                        |
| Amostra 2                                   | 240,19                       | 435,21                        | 240,23                       | 435,44                        | 240,47                        |
| Amostra 3                                   | 243,06                       | 438,82                        | 242,83                       | 439,11                        | 243,14                        |

**Tabela D8: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| <b>NOME DA AMOSTRA: ARG<sub>AR1MF</sub></b> |                              |                               |                              |                               |                               |
|---|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Massa (g)                                   | <b>Aos 28 dias</b>           | <b>Após 24 h na estufa</b>    | <b>Após 48h na estufa</b>    | <b>Após 72h na estufa</b>     | <b>Após 24h amostra (SSS)</b> |
| Data  | 05/12/2017                   | 06/12/2017                    | 07/12/2017                   | 08/12/2017                    | 09/12/2017                    |
| Amostra 1                                   | 443,66                       | 413,06                        | 409,26                       | 408,58                        | 437,87                        |
| Amostra 2                                   | 447,85                       | 415,24                        | 410,65                       | 409,94                        | 436,34                        |
| Amostra 3                                   | 441,29                       | 409,54                        | 405,71                       | 405,05                        | 435,8                         |
| Massa (g)                                   | <b>Após 24h Hidrostática</b> | <b>Após 48h amostra (SSS)</b> | <b>Após 48h Hidrostática</b> | <b>Após 72h amostra (SSS)</b> | <b>Após 72h Hidrostática</b>  |
| Data  | 09/12/2017                   | 10/12/2017                    | 10/12/2017                   | 11/12/2017                    | 11/12/2017                    |
| Amostra 1                                   | 244,57                       | 439,89                        | 246,19                       | 440,08                        | 246,38                        |
| Amostra 2                                   | 239,29                       | 441,35                        | 243,62                       | 441,56                        | 243,9                         |
| Amostra 3                                   | 242                          | 437,25                        | 243,33                       | 437,55                        | 243,5                         |

**Tabela D9: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| <b>NOME DA AMOSTRA: ARG<sub>AR2MF</sub></b> |                              |                               |                              |                               |                               |
|---|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Massa (g)                                   | <b>Aos 28 dias</b>           | <b>Após 24 h na estufa</b>    | <b>Após 48h na estufa</b>    | <b>Após 72h na estufa</b>     | <b>Após 24h amostra (SSS)</b> |
| Data  | 08/12/2017                   | 09/12/2017                    | 10/12/2017                   | 11/12/2017                    | 12/12/2017                    |
| Amostra 1                                   | 449,03                       | 415,58                        | 412,7                        | 412,48                        | 444,4                         |
| Amostra 2                                   | 445,18                       | 411,06                        | 407,68                       | 407,38                        | 439,2                         |
| Amostra 3                                   | 449,63                       | 414,37                        | 411,88                       | 411,51                        | 444,5                         |
| Massa (g)                                   | <b>Após 24h Hidrostática</b> | <b>Após 48h amostra (SSS)</b> | <b>Após 48h Hidrostática</b> | <b>Após 72h amostra (SSS)</b> | <b>Após 72h Hidrostática</b>  |
| Data  | 12/12/2017                   | 13/12/2017                    | 13/12/2017                   | 14/12/2017                    | 14/12/2017                    |
| Amostra 1                                   | 248,06                       | 444,9                         | 248,35                       | 445,13                        | 248,58                        |
| Amostra 2                                   | 243,8                        | 439,77                        | 244,25                       | 440,07                        | 244,58                        |
| Amostra 3                                   | 247,45                       | 444,98                        | 247,78                       | 445,27                        | 247,94                        |

**Tabela D10: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| NOME DA AMOSTRA: ARG <sub>ARIF</sub> |                       |                        |                       |                       |                        |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Massa (g)                            | Aos 28 dias           | Após 24 h na estufa    | Após 48h na estufa    | Após 72h na estufa    | Após 24h amostra (SSS) |
| Data                                 | 11/12/2017            | 12/12/2017             | 13/12/2017            | 14/12/2017            | 15/12/2017             |
| Amostra 1                            | 451,52                | 418,57                 | 416,8                 | 416,92                | 448,04                 |
| Amostra 2                            | 451,56                | 419,16                 | 417,4                 | 417,64                | 448,34                 |
| Amostra 3                            | 452,3                 | 420,34                 | 418,91                | 419,06                | 448,92                 |
| Massa (g)                            | Após 24h Hidrostática | Após 48h amostra (SSS) | Após 48h Hidrostática | Após 72h amostr (SSS) | Após 72h Hidrostática  |
| Data                                 | 15/12/2017            | 16/12/2017             | 16/12/2017            | 17/12/2017            | 17/12/2017             |
| Amostra 1                            | 251,59                | 448,22                 | 251,77                | 448,31                | 251,87                 |
| Amostra 2                            | 252,06                | 448,43                 | 252,2                 | 448,57                | 252,38                 |
| Amostra 3                            | 251,56                | 448,99                 | 251,9                 | 449,16                | 252,2                  |

**Tabela D11: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| NOME DA AMOSTRA: ARG <sub>AR2F</sub> |                       |                        |                       |                        |                        |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Massa (g)                            | Aos 28 dias           | Após 24 h na estufa    | Após 48h na estufa    | Após 72h na estufa     | Após 24h amostra (SSS) |
| Data                                 | 12/12/2017            | 13/12/2017             | 14/12/2017            | 15/12/2017             | 16/12/2017             |
| Amostra 1                            | 440,44                | 409,93                 | 408,58                | 405,81                 | 434,79                 |
| Amostra 2                            | 449,67                | 418,11                 | 416,69                | 414,09                 | 441,27                 |
| Amostra 3                            | <b>442,92</b>         | <b>410,36</b>          | <b>408,91</b>         | <b>406,1</b>           | <b>438,46</b>          |
| Massa (g)                            | Após 24h Hidrostática | Após 48h amostra (SSS) | Após 48h Hidrostática | Após 72h amostra (SSS) | Após 72h Hidrostática  |
| Data                                 | 16/12/2017            | 17/12/2017             | 17/12/2017            | 18/12/2017             | 18/12/2017             |
| Amostra 1                            | 241,89                | 435,36                 | 242,57                | 435,83                 | 242,85                 |
| Amostra 2                            | 243,97                | 442,75                 | 245,43                | 443,32                 | 246,1                  |
| Amostra 3                            | 244,92                | 438,75                 | 245,17                | 438,93                 | 245,46                 |

**Tabela D12: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| NOME DA AMOSTRA: ARG <sub>ARIAC25%</sub> |                  |                |               |               |                   |
|--|------------------|----------------|---------------|---------------|-------------------|
| Massa (g)                                | Aos 28 dias      | 24 h na estufa | 48h na estufa | 72h na estufa | 24h amostra (SSS) |
| Data                                     | 15/12/2017       | 16/12/2017     | 17/12/2017    | 18/12/2017    | 19/12/2017        |
| Amostra 1                                | 441,66           | 411,29         | 407,26        | 406,56        | 436,94            |
| Amostra 2                                | 439,57           | 407,74         | 404,55        | 404,06        | 435,52            |
| Amostra 3                                | 442,84           | 408,85         | 405,71        | 405,3         | 437,97            |
| Massa (g)                                | 24h Hidrostática | 48h (SSS)      | 48h Hidros.   | 72h (SSS)     | 72h Hidrostática  |
| Data                                     | 19/12/2017       | 20/12/2017     | 20/12/2017    | 21/12/2017    | 21/12/2017        |
| Amostra 1                                | 243,94           | 437,29         | 244,26        | 437,35        | 244,47            |
| Amostra 2                                | 242,03           | 435,82         | 242,23        | 435,88        | 242,37            |
| Amostra 3                                | 4243,19          | 438,31         | 243,5         | 438,38        | 243,65            |

**Tabela D13: Dados intermediários das massas do ensaio de absorção por imersão.**

| <b>NOME DA AMOSTRA: ARG<sub>AR2</sub> AC25%</b> |                              |                              |                              |                               |                                |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| <b>Massa (g)</b>                                | <b>Aos 28 dias</b>           | <b>Após 24 h na estufa</b>   | <b>Após 48h na estufa</b>    | <b>Após 72h na estufa</b>     | <b>Após 24h amostra (SSSS)</b> |
| Data  | 08/01/2018                   | 09/01/2018                   | 10/01/2018                   | 11/01/2018                    | 12/01/2018                     |
| Amostra 1                                       | 437,42                       | 404,06                       | 401,17                       | 400,78                        | 432,46                         |
| Amostra 2                                       | 436,27                       | 403,65                       | 401,21                       | 400,84                        | 432,08                         |
| Amostra 3                                       | 447,96                       | 415,65                       | 412,67                       | 412,24                        | 442,28                         |
| <b>Massa (g)</b>                                | <b>Após 24h Hidrostática</b> | <b>Após 48h amostra (SS)</b> | <b>Após 48h Hidrostática</b> | <b>Após 72h amostra (SSS)</b> | <b>Após 72h Hidrostática</b>   |
| Data  | 12/01/2018                   | 13/01/2018                   | 13/01/2018                   | 14/01/2018                    | 14/01/2018                     |
| Amostra 1                                       | 244,35                       | 432,78                       | 241,27                       | 432,9                         | 241,38                         |
| Amostra 2                                       | 242,02                       | 432,33                       | 242,18                       | 432,37                        | 242,25                         |
| Amostra 3                                       | 246,91                       | 442,84                       | 247,45                       | 442,9                         | 247,59                         |

**Tabela D14: Teste de amostras independentes massa seca (ARGAN, ARGAR1 e ARGAR2)**

|   |                                 | Teste de amostras independentes |      |                                  |       |                       |                 |                          |   |          |  |
|---|---------------------------------|---------------------------------|------|----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---|----------|--|
|   |                                 | para igualdade de variâncias    |      | teste-t para Igualdade de Médias |       |                       |                 |                          |   |          |  |
|   |                                 | F                               | Sig. | t                                | df    | Sig. (2 extremidades) | Diferença média | Erro padrão de diferença | 95% Intervalo de confiança da diferença |          |  |
|   |                                 |                                 |      |                                  |       |                       |                 | Inferior                 | Superior                                |          |  |
| Argamassa referência e Argamassa fração grossa 1            | Variâncias Iguais assumidas     | ,107                            | ,760 | ,978                             | 4     | ,383                  | 7,25000         | 7,40988                  | -13,32313                               | 27,82313 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | ,978                             | 3,946 | ,384                  | 7,25000         | 7,40988                  | -13,43461                               | 27,93461 |  |
| Argamassa referência e Argamassa fração grossa 2            | Variâncias Iguais assumidas     | ,693                            | ,452 | ,652                             | 4     | ,550                  | 4,40667         | 6,76118                  | -14,36539                               | 23,17872 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | ,652                             | 3,582 | ,554                  | 4,40667         | 6,76118                  | -15,26157                               | 24,07491 |  |
| Argamassa referência e Argamassa média grossa 1             | Variâncias Iguais assumidas     | 8,251                           | ,045 | 2,127                            | 4     | ,100                  | 11,89667        | 5,59199                  | -3,62918                                | 27,42252 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | 2,127                            | 2,079 | ,162                  | 11,89667        | 5,59199                  | -11,30824                               | 35,10157 |  |
| Argamassa referência e Argamassa média grossa 2             | Variâncias Iguais assumidas     | 4,456                           | ,102 | 2,201                            | 4     | ,093                  | 12,86333        | 5,84463                  | -3,36397                                | 29,09063 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | 2,201                            | 2,450 | ,135                  | 12,86333        | 5,84463                  | -8,33675                                | 34,06342 |  |
| Argamassa referência e Argamassa média fina 1               | Variâncias Iguais assumidas     | 5,730                           | ,075 | 1,451                            | 4     | ,220                  | 8,31000         | 5,72606                  | -7,58810                                | 24,20810 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | 1,451                            | 2,276 | ,269                  | 8,31000         | 5,72606                  | -13,67702                               | 30,29702 |  |
| Argamassa referência e Argamassa média fina 2               | Variâncias Iguais assumidas     | 5,385                           | ,081 | ,992                             | 4     | ,377                  | 5,71000         | 5,75406                  | -10,26583                               | 21,68583 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | ,992                             | 2,317 | ,413                  | 5,71000         | 5,75406                  | -16,06965                               | 27,48965 |  |
| Argamassa referência e Argamassa fina 1                     | Variâncias Iguais assumidas     | 8,791                           | ,041 | -3,06                            | 4     | ,775                  | -1,70667        | 5,57311                  | -17,18010                               | 13,76677 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | -3,06                            | 2,052 | ,788                  | -1,70667        | 5,57311                  | -25,11759                               | 21,70425 |  |
| Argamassa referência e Argamassa fina 2                     | Variâncias Iguais assumidas     | 2,385                           | ,197 | 1,216                            | 4     | ,291                  | 7,50000         | 6,16640                  | -9,62066                                | 24,62066 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | 1,216                            | 2,908 | ,313                  | 7,50000         | 6,16640                  | -12,48101                               | 27,48101 |  |
| Argamassa referência e Argamassa fracionada 1               | Variâncias Iguais assumidas     | 4,740                           | ,095 | 3,345                            | 4     | ,029                  | 19,44000        | 5,81198                  | 3,30335                                 | 35,57665 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | 3,345                            | 2,402 | ,061                  | 19,44000        | 5,81198                  | -1,95391                                | 40,83391 |  |
| Argamassa referência e Argamassa fracionada 2               | Variâncias Iguais assumidas     | 1,223                           | ,331 | 5,992                            | 4     | ,004                  | 39,01667        | 6,51148                  | 20,93791                                | 57,09543 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | 5,992                            | 3,335 | ,007                  | 39,01667        | 6,51148                  | 19,42412                                | 58,60921 |  |
| Argamassa referência e Argamassa fracionada 25% - 1         | Variâncias Iguais assumidas     | 8,507                           | ,043 | 1,945                            | 4     | ,124                  | 10,86000        | 5,58437                  | -4,64469                                | 26,36469 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | 1,945                            | 2,068 | ,187                  | 10,86000        | 5,58437                  | -12,42693                               | 34,14693 |  |
| Argamassa referência e Argamassa fracionada 25% - 2         | Variâncias Iguais assumidas     | ,734                            | ,440 | 1,718                            | 4     | ,161                  | 11,54667        | 6,72166                  | -7,11565                                | 30,20899 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | 1,718                            | 3,547 | ,170                  | 11,54667        | 6,72166                  | -8,09449                                | 31,18782 |  |
| Argamassa referência e Argamassa fração grossa 2            | Variâncias Iguais assumidas     | ,200                            | ,678 | -.454                            | 4     | ,674                  | -2,84333        | 6,26828                  | -20,24686                               | 14,56020 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | -.454                            | 3,792 | ,675                  | -2,84333        | 6,26828                  | -20,62908                               | 14,94242 |  |
| Argamassa média grossa 1 e Argamassa média grossa 2         | Variâncias Iguais assumidas     | 4,001                           | ,116 | ,477                             | 4     | ,658                  | ,96667          | 2,02520                  | -4,65620                                | 6,58953  |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | ,477                             | 2,673 | ,669                  | ,96667          | 2,02520                  | -5,94780                                | 7,88113  |  |
| Argamassa média fina 1 e Argamassa média fina 2             | Variâncias Iguais assumidas     | ,045                            | ,842 | -1,216                           | 4     | ,291                  | -2,60000        | 2,13737                  | -8,53429                                | 3,33429  |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | -1,216                           | 3,980 | ,291                  | -2,60000        | 2,13737                  | -8,54590                                | 3,34590  |  |
| Argamassa fina 1 e Argamassa fina 2                         | Variâncias Iguais assumidas     | 8,802                           | ,041 | 3,306                            | 4     | ,030                  | 9,20667         | 2,78485                  | 1,47468                                 | 16,93865 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | 3,306                            | 2,214 | ,070                  | 9,20667         | 2,78485                  | -1,73059                                | 20,14392 |  |
| Argamassa fracionada 1 e Argamassa fracionada 2             | Variâncias Iguais assumidas     | ,899                            | ,397 | 5,080                            | 4     | ,007                  | 19,57667        | 3,85355                  | 8,87749                                 | 30,27585 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | 5,080                            | 2,992 | ,015                  | 19,57667        | 3,85355                  | 7,29401                                 | 31,85933 |  |
| Argamassa fracionada 25% - 1 e Argamassa fracionada 25% - 2 | Variâncias Iguais assumidas     | 10,093                          | ,034 | ,177                             | 4     | ,868                  | ,68667          | 3,87779                  | -10,07980                               | 11,45313 |  |
|   | Variâncias Iguais não assumidas |                                 |      | ,177                             | 2,143 | ,875                  | ,68667          | 3,87779                  | -14,97318                               | 16,34651 |  |

**Tabela D15: Teste de amostras independentes massa SSS (ARG<sub>AN</sub>, ARG<sub>AR1</sub> e ARG<sub>AR2</sub>)**

|   |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |      |        |       | teste-t para igualdade de Médias |                 |                          |           | 95% Intervalo de confiança da diferença |  |
|---|---------------------------------|--|------|--------|-------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|-----------|---|--|
|   |                                 | F  | Sig. | t      | df    | Sig. (2 extremidades)            | Diferença média | Erro padrão de diferença | Inferior  | Superior                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa fração grossa 1            | Variâncias iguais assumidas     | ,053   | ,829 | ,811   | 4     | ,463                             | 5,59000         | 6,89644                  | -13,55760 | 24,73760                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | ,811   | 3,974 | ,463                             | 5,59000         | 6,89644                  | -13,60782 | 24,78782                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa fração grossa 2            | Variâncias iguais assumidas     | ,376   | ,573 | ,564   | 4     | ,603                             | 3,61333         | 6,40885                  | -14,18049 | 21,40716                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | ,564   | 3,761 | ,605                             | 3,61333         | 6,40885                  | -14,63619 | 21,86285                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa média grossa 1             | Variâncias iguais assumidas     | 10,185                                       | ,033 | 1,769  | 4     | ,152                             | 8,98667         | 5,07917                  | -5,11537  | 23,08871                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,769  | 2,012 | ,218                             | 8,98667         | 5,07917                  | -12,73814 | 30,71148                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa média grossa 2             | Variâncias iguais assumidas     | 3,064  | ,155 | 2,200  | 4     | ,093                             | 12,15000        | 5,52336                  | -3,18531  | 27,48531                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 2,200  | 2,720 | ,124                             | 12,15000        | 5,52336                  | -6,49725  | 30,79725                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa média fina 1               | Variâncias iguais assumidas     | 6,394  | ,065 | 1,495  | 4     | ,209                             | 7,78000         | 5,20466                  | -6,67047  | 22,23047                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,495  | 2,213 | ,262                             | 7,78000         | 5,20466                  | -12,67333 | 28,23333                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa média fina 2               | Variâncias iguais assumidas     | 4,496  | ,101 | ,751   | 4     | ,494                             | 4,02000         | 5,35197                  | -10,83946 | 18,87946                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | ,751   | 2,449 | ,518                             | 4,02000         | 5,35197                  | -15,39817 | 23,43817                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa fina 1                     | Variâncias iguais assumidas     | 10,256                                       | ,033 | -2,30  | 4     | ,829                             | -1,17000        | 5,07751                  | -15,26743 | 12,92743                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -2,30  | 2,010 | ,839                             | -1,17000        | 5,07751                  | -22,91465 | 20,57465                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa fina 2                     | Variâncias iguais assumidas     | 3,104  | ,153 | 1,477  | 4     | ,214                             | 8,15000         | 5,51717                  | -7,16811  | 23,46811                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,477  | 2,710 | ,245                             | 8,15000         | 5,51717                  | -10,51876 | 26,81876                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa fracionada 1               | Variâncias iguais assumidas     | 3,535  | ,133 | 2,410  | 4     | ,074                             | 13,15000        | 5,45624                  | -1,99895  | 28,29895                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 2,410  | 2,615 | ,108                             | 13,15000        | 5,45624                  | -5,75374  | 32,05374                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa fracionada 2               | Variâncias iguais assumidas     | 3,104  | ,153 | 1,477  | 4     | ,214                             | 8,15000         | 5,51717                  | -7,16811  | 23,46811                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,477  | 2,710 | ,245                             | 8,15000         | 5,51717                  | -10,51876 | 26,81876                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa fracionada 25% - 1         | Variâncias iguais assumidas     | 8,238  | ,045 | 2,012  | 4     | ,115                             | 10,30667        | 5,12290                  | -3,91679  | 24,53012                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 2,012  | 2,082 | ,177                             | 10,30667        | 5,12290                  | -10,92579 | 31,53912                                |  |
| SSS - Argamassa referência e Argamassa fracionada 25% - 2         | Variâncias iguais assumidas     | ,813   | ,418 | 1,872  | 4     | ,135                             | 11,45333        | 6,11957                  | -5,53731  | 28,44398                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,872  | 3,510 | ,144                             | 11,45333        | 6,11957                  | -6,51410  | 29,42076                                |  |
| SSS - Argamassa fração grossa 1 e Argamassa fração grossa 2       | Variâncias iguais assumidas     | ,124   | ,742 | -,324  | 4     | ,762                             | -1,97667        | 6,09906                  | -18,91037 | 14,95703                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -,324  | 3,882 | ,763                             | -1,97667        | 6,09906                  | -19,11545 | 15,16211                                |  |
| SSS - Argamassa média grossa 1 e Argamassa média grossa 2         | Variâncias iguais assumidas     | 3,175  | ,149 | 1,433  | 4     | ,225                             | 3,16333         | 2,20674                  | -2,96357  | 9,29023                                 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,433  | 2,067 | ,284                             | 3,16333         | 2,20674                  | -6,04318  | 12,36984                                |  |
| SSS - Argamassa média fina 1 e Argamassa média fina 2             | Variâncias iguais assumidas     | 1,066  | ,360 | -1,814 | 4     | ,144                             | -3,76000        | 2,07277                  | -9,51493  | 1,99493                                 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -1,814 | 3,537 | ,153                             | -3,76000        | 2,07277                  | -9,82483  | 2,30483                                 |  |
| SSS - Argamassa fina 1 e Argamassa fina 2                         | Variâncias iguais assumidas     | 4,311  | ,106 | 4,261  | 4     | ,013                             | 9,32000         | 2,18734                  | 3,24696   | 15,39304                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 4,261  | 2,054 | ,049                             | 9,32000         | 2,18734                  | ,14000    | 18,50000                                |  |
| SSS - Argamassa fracionada 1 e Argamassa fracionada 2             | Variâncias iguais assumidas     | ,332   | ,595 | 4,501  | 4     | ,011                             | 16,20333        | 3,59955                  | 6,20937   | 26,19729                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 4,501  | 3,508 | ,015                             | 16,20333        | 3,59955                  | 5,63176   | 26,77491                                |  |
| SSS - Argamassa fracionada 25% - 1 e Argamassa fracionada 25% - 2 | Variâncias iguais assumidas     | 9,267  | ,038 | ,328   | 4     | ,760                             | 1,14667         | 3,50106                  | -8,57383  | 10,86717                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | ,328   | 2,179 | ,772                             | 1,14667         | 3,50106                  | -12,79097 | 15,08431                                |  |

**Tabela D16: Teste de amostras independentes massa hidrostática (ARG<sub>AN</sub>, ARG<sub>AR1</sub> e ARG<sub>AR2</sub>)**

|   |                                 | Teste de amostras independentes              |      |         |       |                                  |                 |                          |           |   |  |
|---|---------------------------------|--|------|---------|-------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|-----------|---|--|
|   |                                 | Teste de Levene para igualdade de variâncias |      |         |       | teste-t para Igualdade de Médias |                 |                          |           | 95% Intervalo de confiança da diferença |  |
|   |                                 | F  | Sig. | t       | df    | Sig. (2 extremidades)            | Diferença média | Erro padrão de diferença | Inferior  | Superior                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fração grossa 1                                   | Variâncias iguais assumidas     | ,110   | ,756 | -11,767 | 4     | ,000                             | -55,35333       | 4,70426                  | -68,41444 | -42,29223                               |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -11,767 | 3,869 | ,000                             | -55,35333       | 4,70426                  | -68,59084 | -42,11582                               |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fração grossa 2                                   | Variâncias iguais assumidas     | ,141   | ,726 | ,230    | 4     | ,829                             | ,91000          | 3,95039                  | -10,05804 | 11,87804                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | ,230    | 3,904 | ,829                             | ,91000          | 3,95039                  | -10,16556 | 11,98556                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa média grossa 1                                    | Variâncias iguais assumidas     | 6,753  | ,060 | 1,137   | 4     | ,319                             | 3,46667         | 3,04893                  | -4,99851  | 11,93184                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,137   | 2,119 | ,368                             | 3,46667         | 3,04893                  | -8,97300  | 15,90633                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa média grossa 2                                    | Variâncias iguais assumidas     | 1,633  | ,270 | 2,648   | 4     | ,057                             | 9,07000         | 3,42485                  | -4,3892   | 18,57892                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 2,648   | 3,099 | ,075                             | 9,07000         | 3,42485                  | -1,63595  | 19,77595                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa média fina 1                                      | Variâncias iguais assumidas     | 4,542  | ,100 | 1,540   | 4     | ,198                             | 4,83000         | 3,13681                  | -3,87919  | 13,53919                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,540   | 2,357 | ,245                             | 4,83000         | 3,13681                  | -6,88657  | 16,54657                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa média fina 2                                      | Variâncias iguais assumidas     | 2,980  | ,159 | ,735    | 4     | ,503                             | 2,39000         | 3,25070                  | -6,63539  | 11,41539                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | ,735    | 2,663 | ,522                             | 2,39000         | 3,25070                  | -8,73798  | 13,51798                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fina 1  | Variâncias iguais assumidas     | 9,121  | ,039 | -,906   | 4     | ,416                             | -2,72667        | 3,00841                  | -11,07934 | 5,62601                                 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -,906   | 2,010 | ,460                             | -2,72667        | 3,00841                  | -15,61001 | 10,15668                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fina 2  | Variâncias iguais assumidas     | 4,077  | ,114 | 1,460   | 4     | ,218                             | 4,62000         | 3,16484                  | -4,16701  | 13,40701                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,460   | 2,433 | ,260                             | 4,62000         | 3,16484                  | -6,92079  | 16,16079                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fracionada 1                                      | Variâncias iguais assumidas     | ,156   | ,713 | -10,216 | 4     | ,001                             | -48,45000       | 4,74242                  | -61,61707 | -35,28293                               |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -10,216 | 3,850 | ,001                             | -48,45000       | 4,74242                  | -61,82139 | -35,07861                               |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fracionada 2                                      | Variâncias iguais assumidas     | ,001   | ,982 | -6,325  | 4     | ,003                             | -27,23000       | 4,30491                  | -39,18234 | -15,27766                               |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -6,325  | 3,997 | ,003                             | -27,23000       | 4,30491                  | -39,18545 | -15,27455                               |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fracionada 25% - 1                                | Variâncias iguais assumidas     | 6,191  | ,068 | 1,933   | 4     | ,125                             | 5,92667         | 3,06620                  | -2,58647  | 14,43981                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,933   | 2,165 | ,183                             | 5,92667         | 3,06620                  | -6,34723  | 18,20057                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fracionada 25% - 2                                | Variâncias iguais assumidas     | ,880   | ,401 | 1,589   | 4     | ,187                             | 5,68333         | 3,57728                  | -4,24878  | 15,61545                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 1,589   | 3,422 | ,199                             | 5,68333         | 3,57728                  | -4,94676  | 16,31342                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fração grossa 1 e Argamassa fração grossa 2       | Variâncias iguais assumidas     | ,429   | ,548 | 12,683  | 4     | ,000                             | 56,26333        | 4,43612                  | 43,94668  | 68,57999                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 12,683  | 3,604 | ,000                             | 56,26333        | 4,43612                  | 43,39394  | 69,13273                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa média grossa 1 e Argamassa média grossa 2         | Variâncias iguais assumidas     | 1,877  | ,243 | 3,252   | 4     | ,031                             | 5,60333         | 1,72312                  | ,81917    | 10,38749                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 3,252   | 2,393 | ,065                             | 5,60333         | 1,72312                  | -,75865   | 11,96531                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa média fina 1 e Argamassa média fina 2             | Variâncias iguais assumidas     | ,651   | ,465 | -1,592  | 4     | ,187                             | -2,44000        | 1,53304                  | -6,69641  | 1,81641                                 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -1,592  | 3,650 | ,193                             | -2,44000        | 1,53304                  | -6,86217  | 1,98217                                 |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fina 1 e Argamassa fina 2                         | Variâncias iguais assumidas     | 8,583  | ,043 | 7,309   | 4     | ,002                             | 7,34667         | 1,00514                  | 4,55594   | 10,13739                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 7,309   | 2,090 | ,016                             | 7,34667         | 1,00514                  | 3,19597   | 11,49737                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fracionada 1 e Argamassa fracionada 2             | Variâncias iguais assumidas     | ,151   | ,718 | 4,428   | 4     | ,011                             | 21,22000        | 4,79232                  | 7,91438   | 34,52562                                |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | 4,428   | 3,885 | ,012                             | 21,22000        | 4,79232                  | 7,75704   | 34,68296                                |  |
| HIDROT - Argamassa referência e Argamassa fracionada 25% - 1 e Argamassa fracionada 25% - 2 | Variâncias iguais assumidas     | 5,823  | ,073 | -,120   | 4     | ,911                             | -,24333         | 2,03521                  | -5,89398  | 5,40731                                 |  |
|   | Variâncias iguais não assumidas |  |      | -,120   | 2,392 | ,914                             | -,24333         | 2,03521                  | -7,75794  | 7,27127                                 |  |



**Tabela D17: Resultados dos testes estatísticos para as propriedades físicas: Absorção de água por Imersão (%), Índice de vazios (%) e Massa específica Seca (g/cm<sup>3</sup>) das argamassas ARG<sub>AN</sub>, ARG<sub>ARI</sub> e ARG<sub>AR2</sub>.**

| <b>Absorção de Água</b>                         |   |   |  |
|---|---|---|--|
| <b>Condições de estudos das argamassas</b>      | <b>ARG<sub>AN</sub>/ARG<sub>ARI</sub></b> | <b>ARG<sub>AN</sub>/ARG<sub>AR2</sub></b> | <b>ARG<sub>ARI</sub>/ARG<sub>AR2</sub></b> |
| Grossa  | não significativo                         | não significativo                         | não significativo                          |
| Média Grossa                                    | não significativo                         | não significativo                         | não significativo                          |
| Média Fina                                      | não significativo                         | não significativo                         | não significativo                          |
| Fina  | não significativo                         | não significativo                         | não significativo                          |
| Areia composta                                  | significativo                             | significativo                             | significativo                              |
| Areia composta 25%                              | não significativo                         | não significativo                         | não significativo                          |
| <b>Índice de Vazios e Massa Específica Seca</b> |   |   |  |
| <b>Condições de estudos das argamassas</b>      | <b>ARG<sub>AN</sub>/ARG<sub>ARI</sub></b> | <b>ARG<sub>AN</sub>/ARG<sub>AR2</sub></b> | <b>ARG<sub>ARI</sub>/ARG<sub>AR2</sub></b> |
| Grossa  | não significativo                         | não significativo                         | não significativo                          |
| Média Grossa                                    | não significativo                         | não significativo                         | não significativo                          |
| Média Fina                                      | não significativo                         | não significativo                         | não significativo                          |
| Fina  | não significativo                         | não significativo                         | não significativo                          |
| Areia composta                                  | significativo                             | significativo                             | significativo                              |
| Areia composta 25%                              | não significativo                         | não significativo                         | não significativo                          |

# APÊNDICE E – CURVAS GRANULOMETRIAS E RELATÓRIOS DE BET

Tabela E1: Curva granulometria da fração FP1 0min

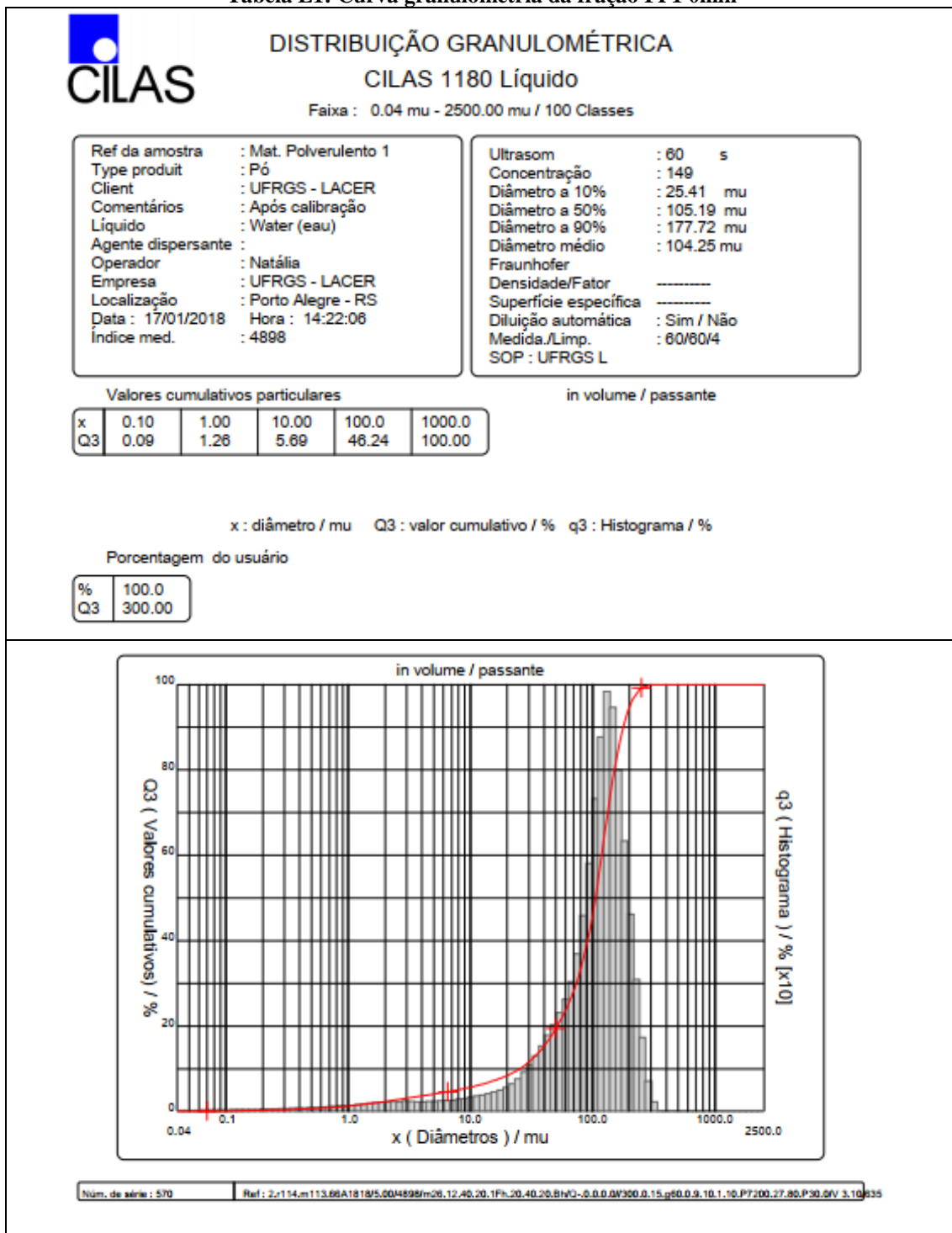


Tabela E2: Curva granulometria da fração FP1 4min

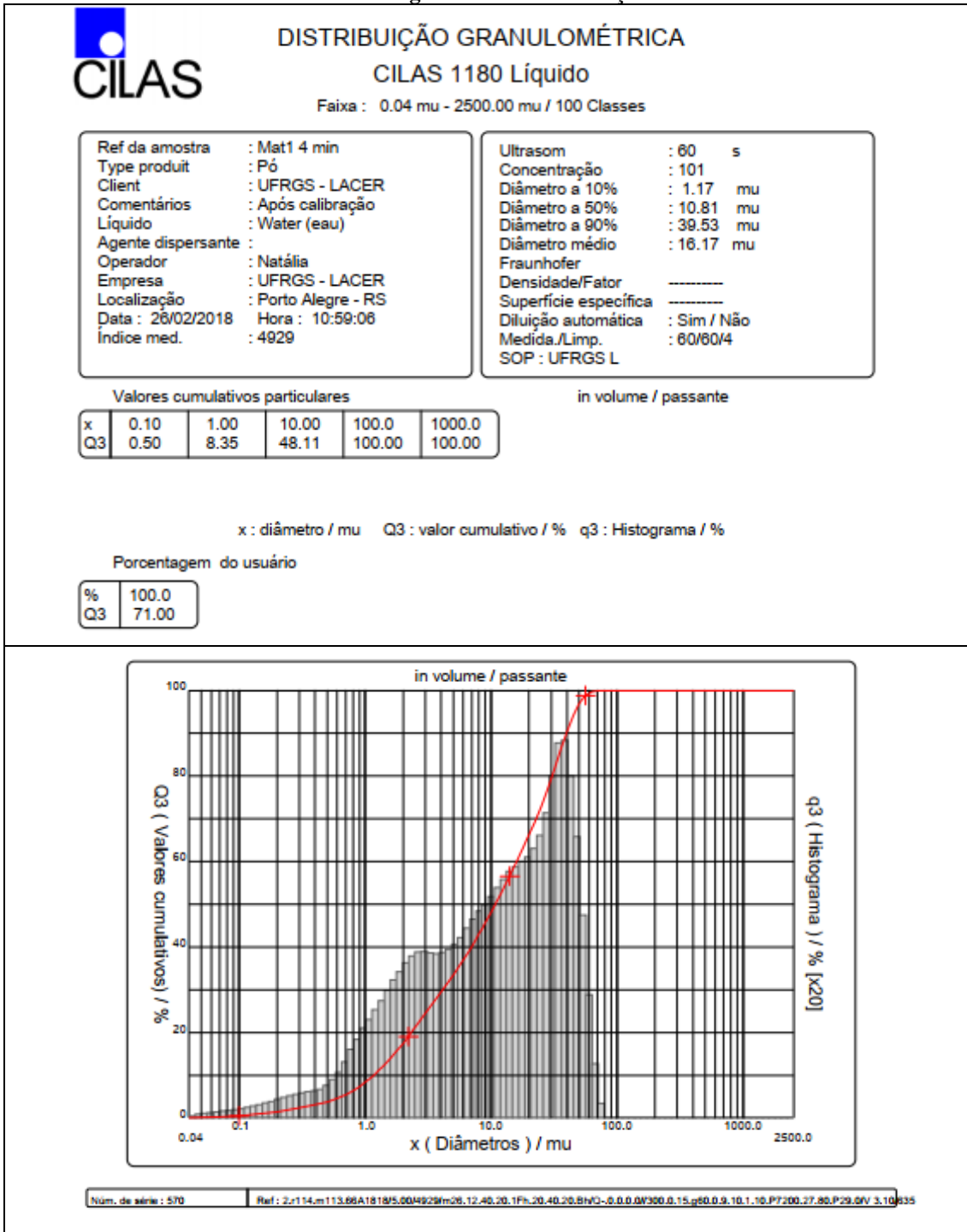


Tabela E3: Curva granulometria da fração FP1 6 min

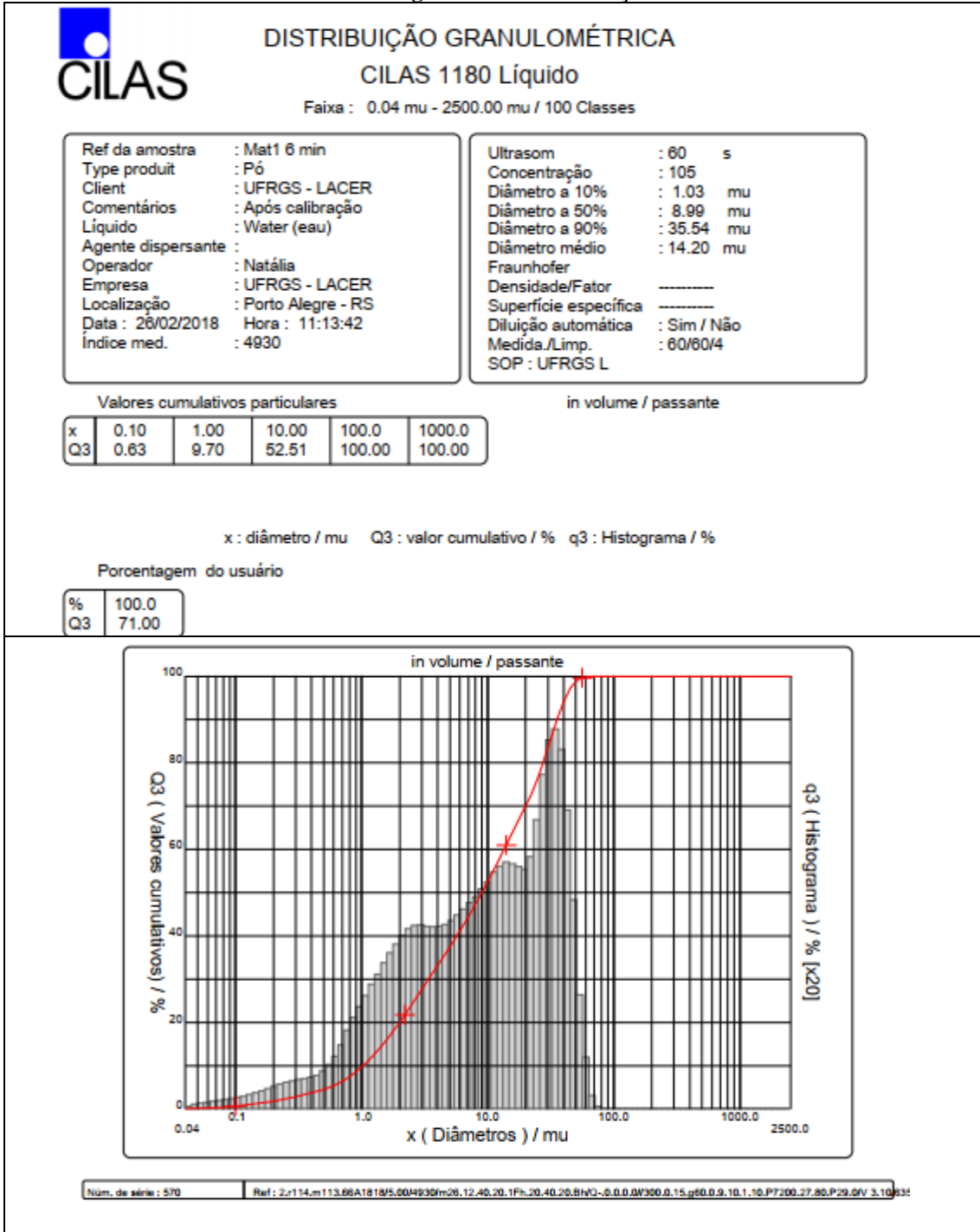


Tabela E4: Curva granulometria da fração FP1 8 min

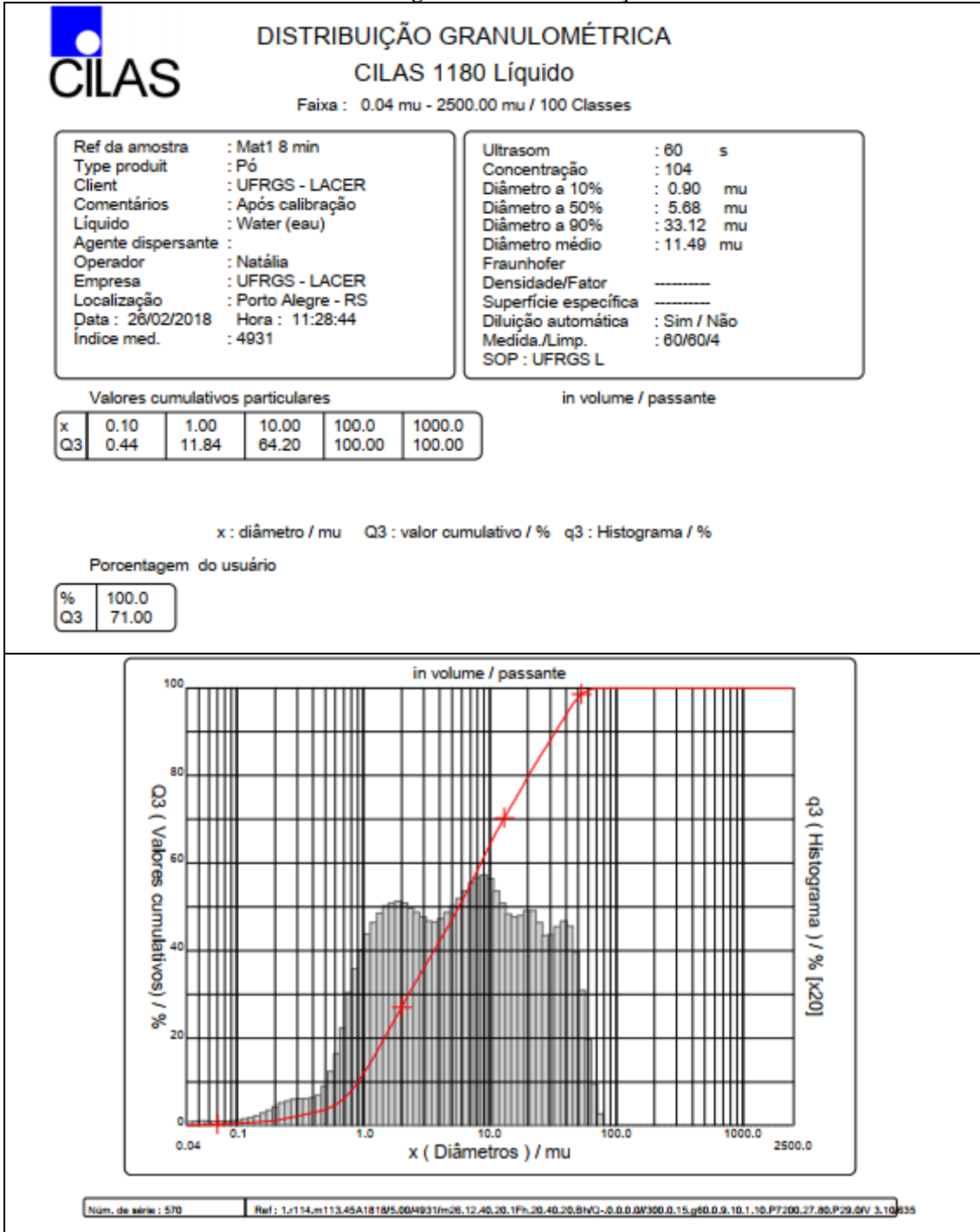


Tabela E5: Curva granulometria da fração FP2 0min

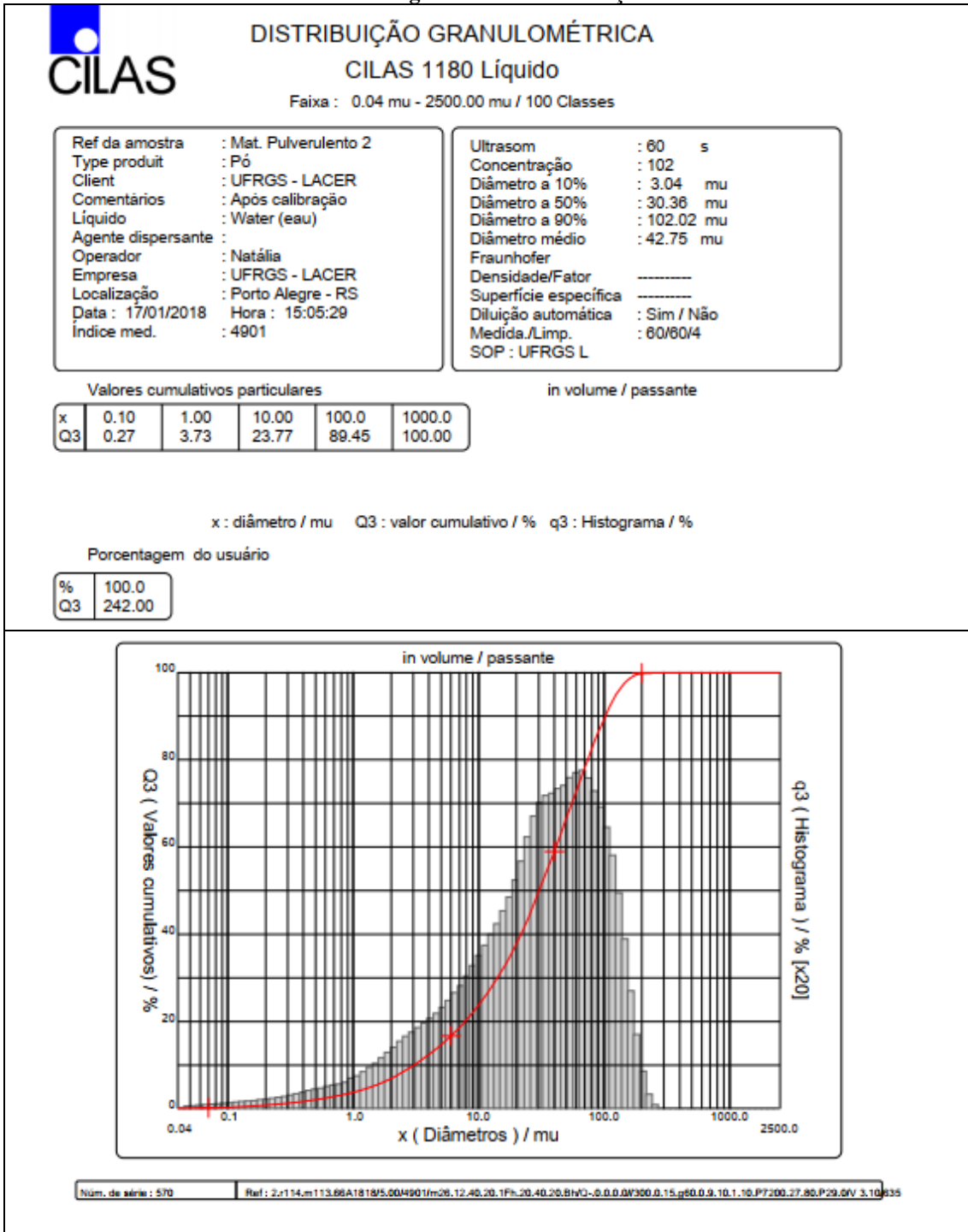


Tabela E6: Curva granulometria da fração FP2 4min

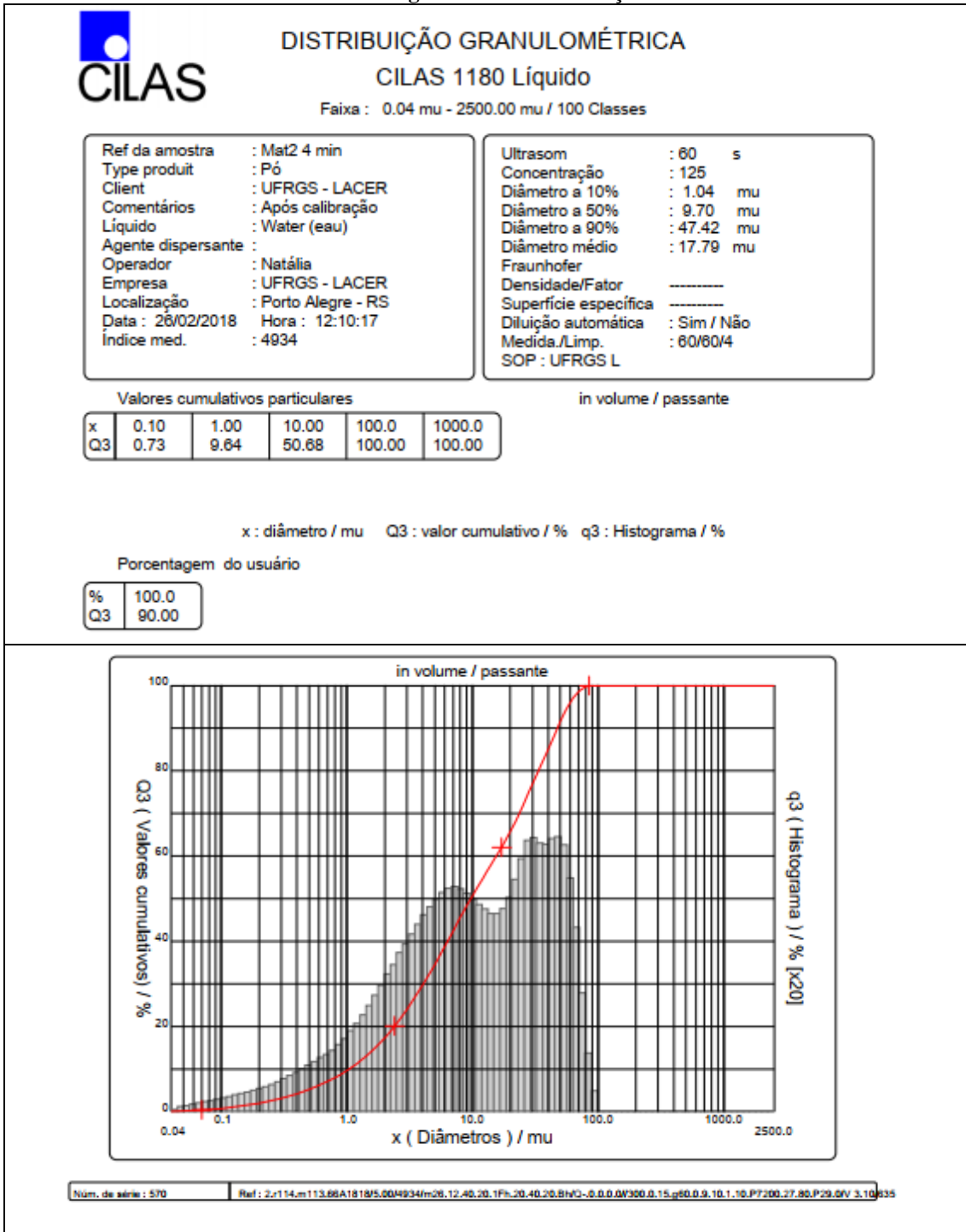


Tabela E7: Curva granulometria da fração FP2 6min

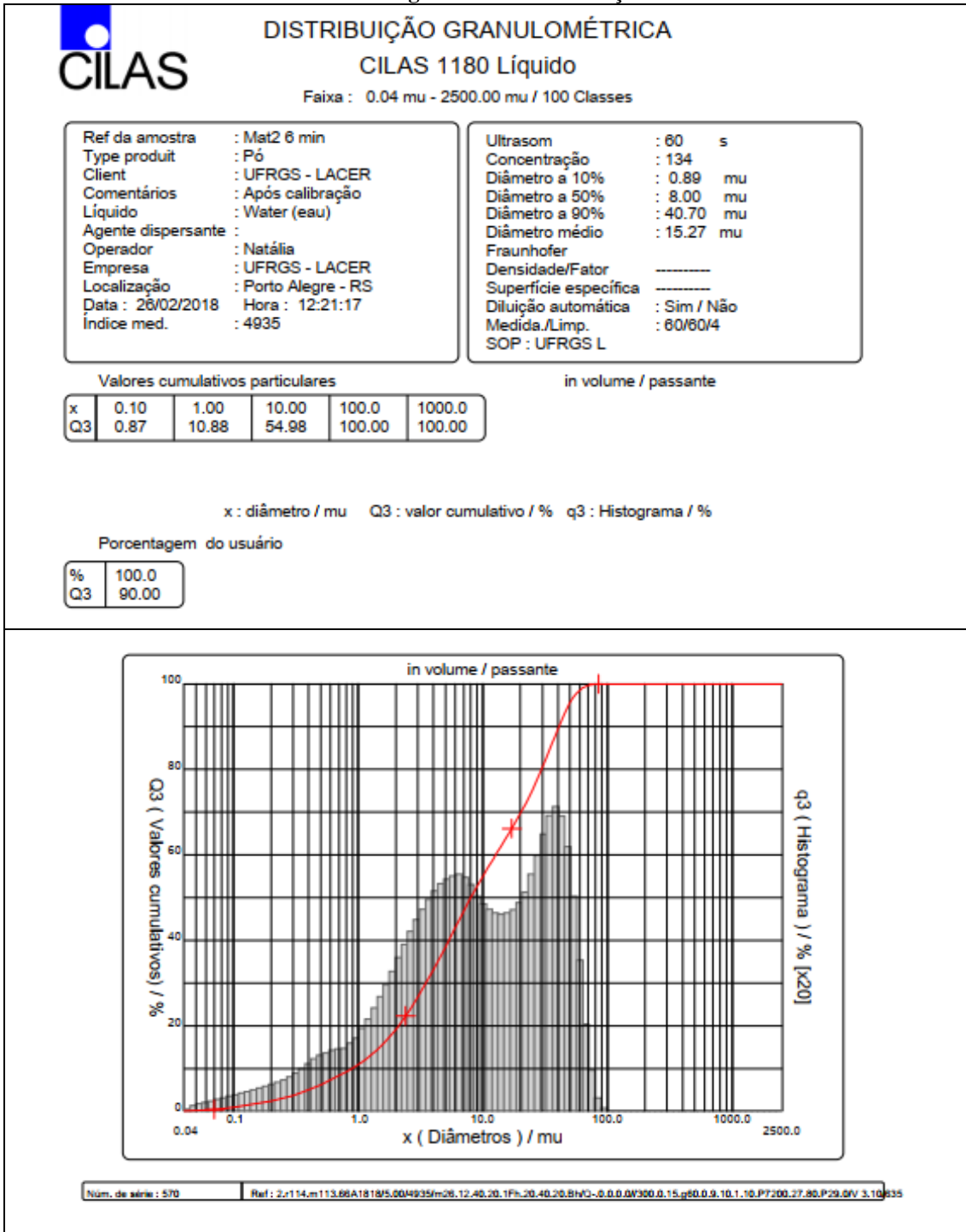




Tabela E8: Curva granulometria da fração FP2 8min

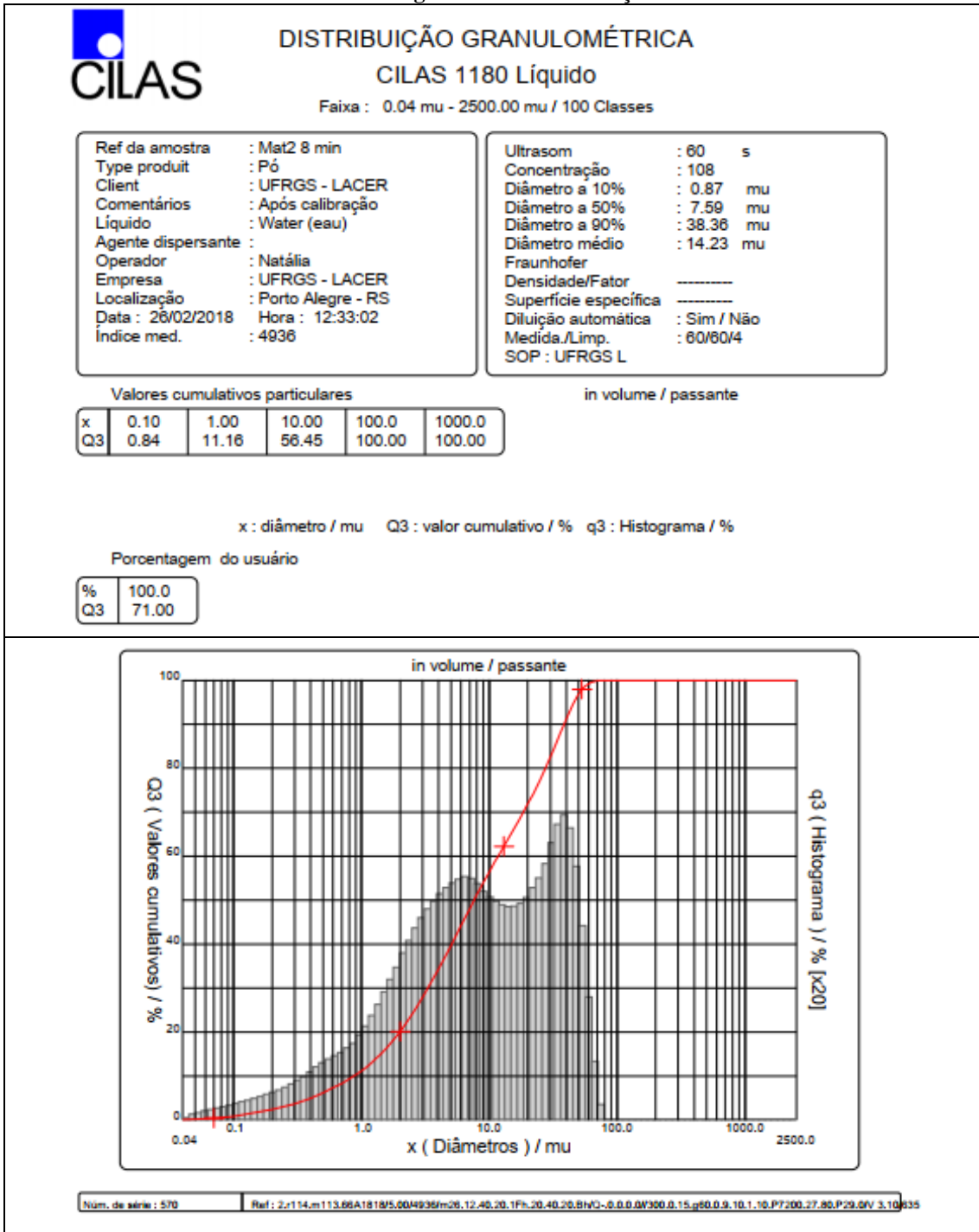


Tabela E9: Relatório do ensaio BET da fração FP1 4min


| Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction<br>for NOVA Instruments<br>©1994-2012, Quantachrome Instruments<br>version 11.02 |                       |                         |                          |                     |                       |  |                       |
|--|-----------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|---|-----------------------|
| <b>Analysis</b>  |                       | <b>Data:</b> 2018/05/04 |                          | <b>Report</b>       |                       | <b>Date:</b> 2018/05/04   |                       |
| Operator:  | LACER                 | Filename:               | 04052018_3.qps           | Operator:           | LACER                 |   |                       |
| Sample ID:   | MAT1_4min             | Comment:                |                          | Sample Volume:      | 0.6248 cc             | Sample Density:   | 1 g/cc                |
| Sample Desc:   |                       | Outgas Temp:            | 300.0 C                  | Outgas Temp:        | 300.0 C               |   |                       |
| Sample weight:   | 0.6248 g              | Bath Temp:              | 273.0 K                  | Bath Temp:          | 273.0 K               |   |                       |
| Outgas Time:   | 0.4 hrs               | Equil time:             | 60/60 sec (ads/des)      | Equil time:         | 60/60 sec (ads/des)   | Equil timeout:  | 240/240 sec (ads/des) |
| Analysis gas:  | Nitrogen              | End of run:             | 2018/05/04 18:44:42      | End of run:         | 2018/05/04 18:44:42   | Instrument:   | Nova Station A        |
| Press. Tolerance:  | 0.100/0.100 (ads/des) |                         |                          |                     |                       |   |                       |
| Analysis Time:   | 22.3 min              |                         |                          |                     |                       |   |                       |
| Cell ID:   | 2                     |                         |                          |                     |                       |   |                       |
| <b>Multi-Point BET</b>   |                       |                         |                          |                     |                       |   |                       |
| <b>Data Reduction Parameters Data</b>  |                       |                         |                          |                     |                       |   |                       |
| <b>Adsorbate</b>   | Nitrogen              | Temperature             | 77.350K                  | Liquid Density:     | 0.808 g/cc            |   |                       |
| Molec. Wt.:  | 28.013                | Cross Section:          | 16.200 Å <sup>2</sup>    |                     |                       |   |                       |
| <b>Multi-Point BET Data</b>  |                       |                         |                          |                     |                       |   |                       |
| Relative Pressure [P/Po]   | Volume @ STP [cc/g]   | 1 / [ W((Po/P) - 1) ]   | Relative Pressure [P/Po] | Volume @ STP [cc/g] | 1 / [ W((Po/P) - 1) ] |   |                       |
| 9.85750e-02  | 1.1207                | 7.8075e+01              | 3.07478e-01              | 1.8323              | 1.9388e+02            |   |                       |
| 1.96867e-01  | 1.4564                | 1.3467e+02              |                          |                     |                       |   |                       |
| <b>BET summary</b>   |                       |                         |                          |                     |                       |   |                       |
| Slope =  |                       | 553.961                 |                          |                     |                       |   |                       |
| Intercept =  |                       | 2.421e+01               |                          |                     |                       |   |                       |
| Correlation coefficient, r =   |                       | 0.999781                |                          |                     |                       |   |                       |
| C constant =   |                       | 23.882                  |                          |                     |                       |   |                       |
| Surface Area =   |                       | 6.023 m <sup>2</sup> /g |                          |                     |                       |   |                       |

Tabela E10: Relatório do ensaio BET da fração FP1 6min


| Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction<br>for NOVA instruments<br>©1994-2012, Quantachrome Instruments<br>version 11.02 |                       |                              |                          |                     |                       |  |            |
|--|-----------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|---|------------|
| <b>Analysis</b>  |                       | <b>Report</b>                |                          |                     |                       |   |            |
| Operator:  | LACER                 | Date:                        | 2018/05/04               | Operator:           | LACER                 | Date:   | 2018/05/04 |
| Sample ID:   | MAT1_6min             | Filename:                    | 04052018_2.qps           |                     |                       |   |            |
| Sample Desc:   |                       | Comment:                     |                          | Sample Density:     | 1 g/cc                |   |            |
| Sample weight:   | 0.6859 g              | Sample Volume:               | 0.6859 cc                |                     |                       |   |            |
| Outgas Time:   | 0.4 hrs               | Outgas Temp:                 | 300.0 C                  |                     |                       |   |            |
| Analysis gas:  | Nitrogen              | Bath Temp:                   | 273.0 K                  |                     |                       |   |            |
| Press. Tolerance:  | 0.100/0.100 (ads/des) | Equil time:                  | 60/60 sec (ads/des)      | Equil timeout:      | 240/240 sec (ads/des) |   |            |
| Analysis Time:   | 22.1 min              | End of run:                  | 2018/05/04 18:08:38      | Instrument:         | Nova Station A        |   |            |
| Cell ID:   | 1                     |                              |                          |                     |                       |   |            |
| <b>Multi-Point BET</b>   |                       |                              |                          |                     |                       |   |            |
| <b>Data Reduction Parameters Data</b>  |                       |                              |                          |                     |                       |   |            |
| Adsorbate  | Nitrogen              | Temperature                  | 77.350K                  | Liquid Density:     | 0.808 g/cc            |   |            |
|  | Molec. Wt.: 28.013    | Cross Section:               | 16.200 Å²                |                     |                       |   |            |
| <b>Multi-Point BET Data</b>  |                       |                              |                          |                     |                       |   |            |
| Relative Pressure [P/Po]   | Volume @ STP [cc/g]   | 1 / [ W((Po/P) - 1) ]        | Relative Pressure [P/Po] | Volume @ STP [cc/g] | 1 / [ W((Po/P) - 1) ] |   |            |
| 1.11586e-01  | 1.2085                | 8.3154e+01                   | 3.07878e-01              | 1.9586              | 1.8172e+02            |   |            |
| 2.05321e-01  | 1.5601                | 1.3250e+02                   |                          |                     |                       |   |            |
| <b>BET summary</b>   |                       |                              |                          |                     |                       |   |            |
|  |                       | Slope =                      | 501.783                  |                     |                       |   |            |
|  |                       | Intercept =                  | 2.796e+01                |                     |                       |   |            |
|  |                       | Correlation coefficient, r = | 0.999843                 |                     |                       |   |            |
|  |                       | C constant =                 | 18.948                   |                     |                       |   |            |
|  |                       | Surface Area =               | 6.574 m²/g               |                     |                       |   |            |

Tabela E11: Relatório do ensaio BET da fração FP1 8min


| Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction<br>for NOVA instruments<br>©1994-2012, Quantachrome Instruments<br>version 11.02 |                       |                              |                          |                     |                       |  |            |
|--|-----------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|---|------------|
| <b>Analysis</b>  |                       | <b>Report</b>                |                          |                     |                       |   |            |
| Operator:  | LACER                 | Date:                        | 2018/05/04               | Operator:           | LACER                 | Date:   | 2018/05/04 |
| Sample ID:   | MAT1_8min             | Filename:                    | 04052018_4.qps           |                     |                       |   |            |
| Sample Desc:   |                       | Comment:                     |                          | Sample Density:     | 1 g/cc                |   |            |
| Sample weight:   | 0.5493 g              | Sample Volume:               | 0.5493 cc                |                     |                       |   |            |
| Outgas Time:   | 0.4 hrs               | Outgas Temp:                 | 300.0 C                  |                     |                       |   |            |
| Analysis gas:  | Nitrogen              | Bath Temp:                   | 273.0 K                  |                     |                       |   |            |
| Press. Tolerance:  | 0.100/0.100 (ads/des) | Equil time:                  | 60/60 sec (ads/des)      | Equil timeout:      | 240/240 sec (ads/des) |   |            |
| Analysis Time:   | 21.0 min              | End of run:                  | 2018/05/04 19:41:36      | Instrument:         | Nova Station A        |   |            |
| Cell ID:   | 3                     |                              |                          |                     |                       |   |            |
| <b>Multi-Point BET</b>   |                       |                              |                          |                     |                       |   |            |
| <b>Data Reduction Parameters Data</b>  |                       |                              |                          |                     |                       |   |            |
| Adsorbate  | Nitrogen              | Temperature                  | 77.350K                  | Liquid Density:     | 0.808 g/cc            |   |            |
|  | Molec. Wt.: 28.013    | Cross Section:               | 16.200 Å²                |                     |                       |   |            |
| <b>Multi-Point BET Data</b>  |                       |                              |                          |                     |                       |   |            |
| Relative Pressure [P/Po]   | Volume @ STP [cc/g]   | 1 / [ W((Po/P) - 1) ]        | Relative Pressure [P/Po] | Volume @ STP [cc/g] | 1 / [ W((Po/P) - 1) ] |   |            |
| 1.07446e-01  | 1.1198                | 8.6011e+01                   | 3.07930e-01              | 1.8488              | 1.9256e+02            |   |            |
| 1.99998e-01  | 1.4651                | 1.3653e+02                   |                          |                     |                       |   |            |
| <b>BET summary</b>   |                       |                              |                          |                     |                       |   |            |
|  |                       | Slope =                      | 531.097                  |                     |                       |   |            |
|  |                       | Intercept =                  | 2.942e+01                |                     |                       |   |            |
|  |                       | Correlation coefficient, r = | 0.999896                 |                     |                       |   |            |
|  |                       | C constant =                 | 19.049                   |                     |                       |   |            |
|  |                       | Surface Area =               | 6.213 m²/g               |                     |                       |   |            |

Tabela E12: Relatório do ensaio BET da fração FP2 4min


| Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction<br>for NOVA Instruments<br>©1994-2012, Quantachrome Instruments<br>version 11.02 |                            |                                     |                                 |                            |                              |  |  |
|--|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------|---|--|
| <b>Analysis</b>  |                            | <b>Date:</b> 2018/05/11             |                                 | <b>Report</b>              |                              | <b>Date:</b> 2018/05/10   |  |
| <b>Operator:</b>   | LACER                      | <b>Filename:</b>                    | 10052018_1.qps                  | <b>Operator:</b>           | LACER                        |   |  |
| <b>Sample ID:</b>  | MAT-4min                   | <b>Comment:</b>                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Sample Desc:</b>  |                            | <b>Sample Volume:</b>               | 0.5745 cc                       | <b>Sample Density:</b>     | 1 g/cc                       |   |  |
| <b>Sample weight:</b>  | 0.5745 g                   | <b>OutgasTemp:</b>                  | 300.0 C                         |                            |                              |   |  |
| <b>Outgas Time:</b>  | 0.4 hrs                    | <b>Bath Temp:</b>                   | 273.0 K                         |                            |                              |   |  |
| <b>Analysis gas:</b>   | Nitrogen                   | <b>Equil time:</b>                  | 60/60 sec (ads/des)             | <b>Equil timeout:</b>      | 240/240 sec (ads/des)        |   |  |
| <b>Press. Tolerance:</b>   | 0.100/0.100 (ads/des)      | <b>End of run:</b>                  | 2018/05/11 21:20:28             | <b>Instrument:</b>         | Nova Station A               |   |  |
| <b>Analysis Time:</b>  | 21.8 min                   |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Cell ID:</b>  | 4                          |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Multi-Point BET</b>   |                            |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Data Reduction Parameters Data</b>  |                            |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Adsorbate</b>   | Nitrogen                   | <b>Temperature</b>                  | 77.350K                         | <b>Liquid Density:</b>     | 0.808 g/cc                   |   |  |
|  | Molec. WT.: 28.013         | <b>Cross Section:</b>               | 16.200 Å <sup>2</sup>           |                            |                              |   |  |
| <b>Multi-Point BET Data</b>  |                            |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Relative Pressure [P/Po]</b>  | <b>Volume @ STP [cc/g]</b> | <b>1 / [ W((Po/P) - 1) ]</b>        | <b>Relative Pressure [P/Po]</b> | <b>Volume @ STP [cc/g]</b> | <b>1 / [ W((Po/P) - 1) ]</b> |   |  |
| 9.58480e-02  | 1.9424                     | 4.3668e+01                          | 3.07121e-01                     | 3.1580                     | 1.1230e+02                   |   |  |
| 2.01410e-01  | 2.5563                     | 7.8940e+01                          |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>BET summary</b>   |                            |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
|  |                            | <b>Slope =</b>                      | 324.861                         |                            |                              |   |  |
|  |                            | <b>Intercept =</b>                  | 1.286e+01                       |                            |                              |   |  |
|  |                            | <b>Correlation coefficient, r =</b> | 0.999864                        |                            |                              |   |  |
|  |                            | <b>C constant =</b>                 | 26.267                          |                            |                              |   |  |
|  |                            | <b>Surface Area =</b>               | 10.312 m <sup>2</sup> /g        |                            |                              |   |  |

Tabela E13: Relatório do ensaio BET da fração FP2 6min



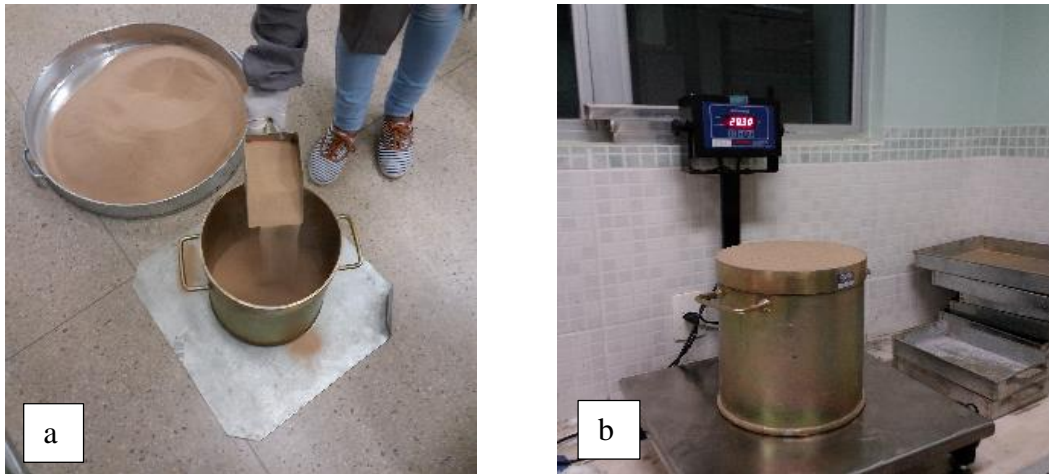
| Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction<br>for NOVA Instruments<br>©1994-2012, Quantachrome Instruments<br>version 11.02 |                            |                                     |                                 |                            |                              |  |  |
|--|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------|---|--|
| <b>Analysis</b>  |                            | <b>Date:</b> 2018/05/11             |                                 | <b>Report</b>              |                              | <b>Date:</b> 2018/05/10   |  |
| <b>Operator:</b>   | LACER                      | <b>Filename:</b>                    | 10052018_2.qps                  | <b>Operator:</b>           | LACER                        |   |  |
| <b>Sample ID:</b>  | MAT2-6min                  | <b>Comment:</b>                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Sample Desc:</b>  |                            | <b>Sample Volume:</b>               | 0.5605 cc                       | <b>Sample Density:</b>     | 1 g/cc                       |   |  |
| <b>Sample weight:</b>  | 0.5605 g                   | <b>OutgasTemp:</b>                  | 300.0 C                         |                            |                              |   |  |
| <b>Outgas Time:</b>  | 0.4 hrs                    | <b>Bath Temp:</b>                   | 273.0 K                         |                            |                              |   |  |
| <b>Analysis gas:</b>   | Nitrogen                   | <b>Equil time:</b>                  | 60/60 sec (ads/des)             | <b>Equil timeout:</b>      | 240/240 sec (ads/des)        |   |  |
| <b>Press. Tolerance:</b>   | 0.100/0.100 (ads/des)      | <b>End of run:</b>                  | 2018/05/11 21:57:53             | <b>Instrument:</b>         | Nova Station A               |   |  |
| <b>Analysis Time:</b>  | 23.3 min                   |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Cell ID:</b>  | 1                          |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Multi-Point BET</b>   |                            |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Data Reduction Parameters Data</b>  |                            |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Adsorbate</b>   | Nitrogen                   | <b>Temperature</b>                  | 77.350K                         | <b>Liquid Density:</b>     | 0.808 g/cc                   |   |  |
|  | Molec. WT.: 28.013         | <b>Cross Section:</b>               | 16.200 Å <sup>2</sup>           |                            |                              |   |  |
| <b>Multi-Point BET Data</b>  |                            |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>Relative Pressure [P/Po]</b>  | <b>Volume @ STP [cc/g]</b> | <b>1 / [ W((Po/P) - 1) ]</b>        | <b>Relative Pressure [P/Po]</b> | <b>Volume @ STP [cc/g]</b> | <b>1 / [ W((Po/P) - 1) ]</b> |   |  |
| 9.64380e-02  | 1.9794                     | 4.3143e+01                          | 3.02887e-01                     | 3.1904                     | 1.0896e+02                   |   |  |
| 2.01858e-01  | 2.5951                     | 7.7977e+01                          |                                 |                            |                              |   |  |
| <b>BET summary</b>   |                            |                                     |                                 |                            |                              |   |  |
|  |                            | <b>Slope =</b>                      | 318.911                         |                            |                              |   |  |
|  |                            | <b>Intercept =</b>                  | 1.279e+01                       |                            |                              |   |  |
|  |                            | <b>Correlation coefficient, r =</b> | 0.999770                        |                            |                              |   |  |
|  |                            | <b>C constant =</b>                 | 25.941                          |                            |                              |   |  |
|  |                            | <b>Surface Area =</b>               | 10.499 m <sup>2</sup> /g        |                            |                              |   |  |

Tabela E14: Relatório do ensaio BET da fração FP2 8min

| Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction<br>for NOVA Instruments<br>©1984-2012, Quantachrome Instruments<br>version 11.02 |                              |                          |                          |                     |                       |  |            |
|--|------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|---|------------|
| <b>Analysis</b>  |                              |                          | <b>Report</b>            |                     |                       |   |            |
| Operator:  | LACER                        | Date:                    | 2018/05/11               | Operator:           | LACER                 | Date:   | 2018/05/11 |
| Sample ID:   | MAT2-8min                    | Filename:                | 11052018_1.qps           |                     |                       |   |            |
| Sample Desc:   |                              | Comment:                 |                          |                     |                       |   |            |
| Sample weight:   | 0.668 g                      | Sample Volume:           | 0.668 cc                 | Sample Density:     | 1 g/cc                |   |            |
| Outgas Time:   | 0.4 hrs                      | Outgas Temp:             | 300.0 C                  |                     |                       |   |            |
| Analysis gas:  | Nitrogen                     | Bath Temp:               | 273.0 K                  |                     |                       |   |            |
| Press. Tolerance:  | 0.100/0.100 (ads/des)        | Equil time:              | 60/60 sec (ads/des)      | Equil timeout:      | 240/240 sec (ads/des) |   |            |
| Analysis Time:   | 21.9 min                     | End of run:              | 2018/05/11 11:53:35      | Instrument:         | Nova Station A        |   |            |
| Cell ID:   | 4                            |                          |                          |                     |                       |   |            |
| <b>Multi-Point BET</b>   |                              |                          |                          |                     |                       |   |            |
| <b>Data Reduction Parameters Data</b>  |                              |                          |                          |                     |                       |   |            |
| <u>Adsorbate</u>   | Nitrogen                     | Temperature              | 77.350K                  | Liquid Density:     | 0.808 g/cc            |   |            |
| Molec. WL:   | 28.013                       | Cross Section:           | 16.200 Å <sup>2</sup>    |                     |                       |   |            |
| <b>Multi-Point BET Data</b>  |                              |                          |                          |                     |                       |   |            |
| Relative Pressure [P/Po]   | Volume @ STP [cc/g]          | 1 / [ W((Po/P) - 1) ]    | Relative Pressure [P/Po] | Volume @ STP [cc/g] | 1 / [ W((Po/P) - 1) ] |   |            |
| 1.20230e-01  | 2.2051                       | 4.9586e+01               | 3.04383e-01              | 3.2527              | 1.0764e+02            |   |            |
| 2.07300e-01  | 2.7043                       | 7.7372e+01               |                          |                     |                       |   |            |
| <b>BET summary</b>   |                              |                          |                          |                     |                       |   |            |
|  | Slope =                      | 315.162                  |                          |                     |                       |   |            |
|  | Intercept =                  | 1.181e+01                |                          |                     |                       |   |            |
|  | Correlation coefficient, r = | 0.999977                 |                          |                     |                       |   |            |
|  | C constant =                 | 27.679                   |                          |                     |                       |   |            |
|  | Surface Area =               | 10.651 m <sup>2</sup> /g |                          |                     |                       |   |            |

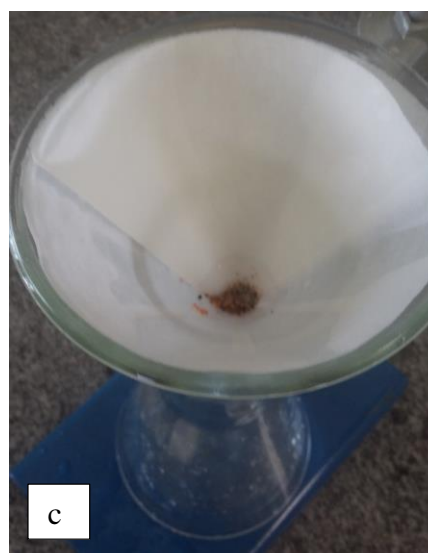
## APÊNDICE F –BANCO DE IMAGENS



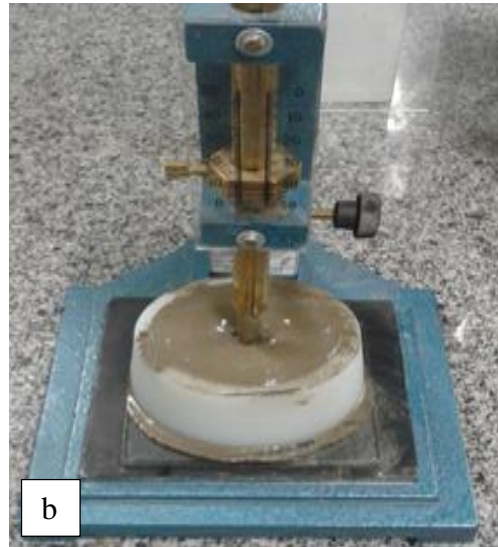
**Figura F1:** Realização dos ensaios de caracterização física: (a) Enchimento do recipiente para determinação da massa unitária, (b) pesagem do recipiente mais amostra para determinação da massa unitária,



**Figura F2** (a) secagem da areia para determinação das massas específicas e absorção de água, (b) separação da fração pulverulenta para realização do ensaio de massa específica.



**Figura F3:** Ensaio de líquidos densos, para detectar teor de cloreto: (a) precipitação da amostra na capela (b) filtragem da amostra precipitada (c) material residual.



**Figura F4:** (a) Ensaio de massa específica pelo método de Le Chatelier, (b) detalhe do aparelho de Vicat, durante a realização do teste de início de pega em pasta de cimento.



**Figura F5:** (a) Imagem da argamassadeira, (b) moldagem dos corpos de prova, (c) corpos de prova após a desforma.