

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO TOTAL
DE AREIA NATURAL POR RCD EM
REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA**

ALINE CRISPIM CANEDO GIRARDI

D0128C16
GOIÂNIA
2016

ALINE CRISPIM CANEDO GIRARDI

AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO TOTAL DE AREIA NATURAL POR RCD EM REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Helena Carasek

D0128C16
GOIÂNIA
2016

Ficha catalográfica elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

Girardi, Aline Crispim Canedo
Avaliação da substituição total de areia natural por RCD em
Revestimentos de Argamassa [manuscrito] / Aline Crispim Canedo
Girardi. - 2016.
CXXX, 130 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Helena Carasek.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Civil (EEC) , Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2016.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de
figuras, lista de tabelas.

1. Revestimento. 2. Argamassa. 3. Resíduo de Construção e
Demolição. 4. Resistência de Aderência. 5. Permeabilidade à água. I.
Carasek, Helena, orient. II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor (a):	Aline Crispim Canedo Girardi		
E-mail:	alinecrispim@gmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não	
Vínculo empregatício do autor	Instituto Federal Goiano		
Agência de fomento: CAPES		Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	GO CNPJ:
Título:	Avaliação da substituição total de areia natural por RCD em revestimentos de argamassa		
Palavras-chave:	Revestimento. Argamassa. Resíduos de Construção e Demolição. Resistência de Aderência. Permeabilidade à água. Fator de empacotamento.		
Título em outra língua:	Evaluation of total replacement of natural sand by RCD in rendering mortar.		
Palavras-chave em outra língua:	Rendering. Mortar. Construction and demolition waste. Adhesive strength. Water permeability.		
Área de concentração:	Construção Civil		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	31/05/2016		
Programa de Pós-Graduação:	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil		
Orientador (a):	Helena Carasek		
E-mail:	Hcarasek@gmail.com		

*Necessita do CPF quando não constar no SisPG

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Aline Crispim Canedo Girardi
Assinatura do (a) autor (a)

Data: 08/06/16

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.



Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

Avaliação da Substituição Total de Areia Natural por RCD em Revestimentos de Argamassa

Aline Crispim Canedo Girardi

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelas senhoras:

Prof.ª Dr.ª Helena Carásek (GECON/UFG)

Prof.ª Dr.ª Maria Carolina Brandstetter (GECON/UFG)

Prof.ª Dr.ª Vanessa Silveira Silva (UFBA)

Goiânia, 31 de maio de 2016.

*À minha mãe, Maria Neuza, meu esposo Neto Girardi,
e minha irmã Alessandra, com muito carinho!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela capacitação e pelas oportunidades que me concedeu, sem que eu merecesse, com toda a certeza.

A CAPES pela bolsa concedida para a viabilidade da pesquisa.

A minha orientadora Prof^ª. Dr^ª. Helena Carasek, que confiou em mim e acreditou nessa pesquisa, que sempre estava pronta para ouvir e atender, orientando não apenas academicamente, mas para a vida pessoal e profissional. Obrigada pela paciência de sempre e por compreender minhas dificuldades e ajudar a superá-las.

A minha preciosa mãe M^a Neuza, que me auxiliou todo o tempo, inclusive pela confecção dos jalecos, não sei como agradecer a senhora pela confiança, carinho e amor a mim dedicados, é mais uma conquista sua.

Ao meu pai, Jarbas (in memoriam) e minha irmã Alessandra, que me ajudou nas correções e me incentivou quando eu queria fraquejar, além de auxiliar nas correções e estar sempre disposta a contribuir.

Ao meu dedicado esposo Euclides Girardi Neto, que com todo o carinho me ajudou confeccionando moldes, fôrmas e ferramentas; participou da realização de ensaios e teve toda a paciência do mundo enquanto eu escrevia esta dissertação. Obrigada por compreender minha ausência e pelo incentivo.

Aos professores do GECON, com os quais tive a oportunidade de fazer disciplinas, Marcus Campos, Oswaldo Cascudo e Tatiana Amaral que acrescentaram muito à minha vida profissional e pessoal e em especial à Prof.^a Dr^a Maria Carolina, pelo companheirismo, incentivo e por aceitar participar da banca para tecer contribuições a esta dissertação.

Ao prof. Dr. Renato Angelim e ao prof. Msc. Renato Araújo, pelo auxílio no desenvolvimento das análises e ensaios, a contribuição de vocês foi importantíssima para esta pesquisa.

Aos amigos e colegas do mestrado Alex Martins, Plínio Pires e, em especial, Marina Malagoni que me ajudaram na realização dos ensaios e serviram como apoio em diversos momentos de dificuldades, sempre incentivando a continuidade da pesquisa.

Ao jovem talento (de fato) Paulo César Martins Filho, que participou ativamente desta pesquisa e se mostrou sempre disposto a auxiliar, com grande responsabilidade e interesse para o bom andamento da pesquisa.

Ao laboratorista Vitor Lopes e aos alunos Leygton Moreira e Paulo Martins que participaram em momentos importantes desta pesquisa e foram de grande auxílio para a realização dos trabalhos.

As empresas Carlos Campos, Renove (RNV), EcoDol Revitalize, Construtora Rodrigues da Cunha e Ical, pelo fornecimento de materiais, realização de ensaios e empréstimo de equipamentos que foram essenciais para a realização desta pesquisa.

Aos colegas de trabalho e amigos do Instituto Federal Goiano, que em todo o tempo me compreenderam, e “seguraram as pontas” nos momentos em que eu precisei me ausentar, sem o apoio de vocês esta jornada teria sido muito mais difícil.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa, se eu fosse nominar cada um não haveria mais espaço nessa dissertação!

RESUMO

Apesar de a utilização de RCD na produção de agregado miúdo ser estudada no Brasil há mais de duas décadas, ainda não há correlações definidas entre as características dos agregados reciclados e o desempenho dos revestimentos, de forma a identificar as propriedades que deverão ser controladas no momento da escolha dos agregados que será incorporado às argamassas, independente do tipo de resíduo original. Nesse sentido, o presente trabalho visa determinar a viabilidade técnica da substituição total de agregado natural por agregado reciclado no preparo de argamassas de revestimento, buscando correlacionar as diversas propriedades e características dos agregados e das argamassas com o desempenho dos revestimentos, no que tange à resistência de aderência à tração e absorção/permeabilidade de água. Para o desenvolvimento da pesquisa utilizou-se três tipos de agregados (areia natural, reciclado misto de material cerâmico e cimentício e reciclado cimentício), em duas granulometrias, passantes pelas peneiras 3 mm e 1,18 mm, os quais foram amplamente caracterizados. As argamassas produzidas foram avaliadas quanto à consistência, densidade de massa, retração, absorção de água por imersão, resistência à compressão e resistência à tração. Os revestimentos foram aplicados sobre blocos cerâmicos, preparados com solução de cal ou chapisco, sendo este último apenas para o revestimento que apresentou o melhor desempenho dentre os produzidos com agregados reciclados. Como principais resultados, verificou-se que a utilização de peneira com abertura de 1,18 mm é eficiente para a redução do teor de finos dos agregados, entretanto, as argamassas e os revestimentos produzidos não apresentaram desempenho satisfatório, ficando aquém dos resultados obtidos com materiais passantes na peneira 3 mm. As argamassas e revestimentos contendo agregado reciclado cimentício não apresentaram desempenho compatível com as demais, em detrimento das suposições iniciais, que previam que esse agregado seria superior ao agregado misto. Também se percebeu que os agregados reciclados mistos de material cerâmico e cimentício, passantes na peneira 3 mm, apesar do alto teor de finos e da elevada absorção de água, assemelham-se muito ao agregado natural de mesma granulometria, quando comparadas as características das argamassas por estes produzidas, principalmente quanto à resistência à compressão. Quando se avaliam os revestimentos produzidos por esses dois agregados, ambos são equivalentes em questão de resistência de aderência à tração e não apresentaram nenhuma fissuração. Em linhas gerais, pode-se concluir que é viável a produção de revestimentos eficientes com substituição total da areia natural por agregados reciclados, desde que limitado o fator de empacotamento dos grãos, que influencia diretamente nas propriedades das argamassas e revestimentos.

Palavras-chave: Revestimento. Argamassa. Resíduos de Construção e Demolição. Resistência de Aderência. Permeabilidade à água.

ABSTRACT

Although the use of CDW in the aggregate production is studied in Brazil for more than two decades, there are still gaps regarding their use in mortars. In this sense, the present study aims to evaluate mortar for rendering masonry produced with full replacement of natural sand by recycled aggregate, seeking to correlate the various properties and characteristics of aggregates and mortars with the performance of rendering with regard to the adhesive strength and absorption/water permeability. For the development of the research three types of aggregates were used (natural sand, mixed recycled ceramic and cement and cementitious recycled) in two particle sizes, passers-by screens 3 mm and 1.18 mm, which were widely characterized. With the data obtained in the characterization of aggregates, different traces were formulated for mortars, keeping fixed the content of total fine plasticizers. The mortars were evaluated on their consistency, bulk density, dimensional instability (shrinkage), water absorption, compressive and flexural strength. The renderings were applied on ceramic blocks, which were selected for initial water absorption rate ranges, avoiding the variability of results due to changes in the suction of the substrate. Two types of preparation of the base were performed, lime solution and roughcast, the latter was used only for the rendering that showed the best performance among those produced with recycled aggregates. As the main results, it was found that using a sieve with an opening of 1.18 mm is effective for reducing the content of fine aggregate, however, mortars and renderings produced with these aggregates showed unsatisfactory performance, falling short of results in materials with through 3 mm sieve. Mortars and rendering produced with recycled aggregate cement did not show compatible performance with the others, at the expense of the initial assumptions, which provided that this aggregate would exceed the aggregate mixed. It was also noticed that the recycled aggregates mixed ceramic and cementitious material, passers the sieve 3 mm, despite the high content of fine and high water absorption, resemble very to the natural aggregate with the same granulometry, when comparing the characteristics of mortars they have produced, mainly for resistance to compression. When assessing the rendering produced by these two aggregates, both are equivalent in the question of adhesive strength and showed no cracking. In general, it can be concluded that it is feasible the production of efficient rendering with complete replacement of natural sand for mixed recycled aggregates since the RCD origin and characteristics are known, Provided that limited the packing factor of grain , which directly influence the properties of mortars and renderings.

Keywords: Rendering. Mortar. Construction and demolition waste. Adhesive strength. Water permeability.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. 1 - Consumo de agregados e evolução da construção civil no decorrer do tempo 17

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1 - Processo de produção de agregados reciclados em Goiânia. (a) Equipamento; (b) Material bruto; (c) Primeira moagem; (d) Retirada de material metálico; (e) Peneira vibratória e (f) agregado miúdo e graúdo resultante..... 26

Figura 2. 2 - Relação água/cimento em função do teor de substituição dos agregados 33

Figura 2. 3 - Tendência de espalhamento em função do teor de substituição..... 35

Figura 2. 4 – Densidade de massa das argamassas no estado fresco em função do teor de substituição..... 36

Figura 2. 5 - Retração aos 360 dias em função do teor de substituição 37

Figura 2. 6 - Evolução da resistência à compressão das argamassas em função do teor de substituição de agregado natural por reciclado 38

Figura 2. 7 - Resistência à tração na flexão das argamassas em função do teor de substituição de RCD..... 38

Figura 2. 8 - Resistência de aderência à tração em função da relação água/cimento..... 42

Figura 2. 9 - Resistência de aderência à tração em função da relação água/cimento..... 43

Figura 2. 10 - Relação água/cimento das argamassas em função do teor de substituição (agregado misto cerâmica e argamassa)..... 44

Figura 2. 11 - Resistência de aderência à tração em função do teor de substituição 45

Figura 2. 12 - Resistência de aderência à tração em função do teor de substituição (base cerâmica com chapisco)..... 46

Figura 2. 13 - Resistência de aderência à tração em função do teor de substituição (base estrutura de concreto)..... 46

Figura 2. 14 - Resistência de aderência à tração em função do teor de substituição (base cerâmica sem chapisco) 47

Figura 2. 15 - Resistência de aderência à tração em função do teor de substituição (base bloco de concreto)..... 47

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1 - Fluxograma apresentando as condições fixas e variáveis do programa experimental 52

Figura 3. 2 – Fluxograma do programa experimental empregado na pesquisa.....	53
Figura 3. 3 - Descrição do ensaio de absorção inicial (a) corpos de prova espalhados no laboratório; (b) bloco numerado sendo pesado; (c) imersão do corpo de prova em lâmina d'água; (d) retirada do excesso de água; (e) retirada do excesso d'água e (f) pesagem do corpo de prova após a imersão.	57
Figura 3. 4 - Vista geral do equipamento de moagem em usina situada na cidade de Aparecida de Goiânia-GO	58
Figura 3. 5 - Medições realizadas na análise por imagem dos agregados (a) Areia Natural; (b) Agregado de resíduo cimentício (c) Agregado de resíduo misto de cerâmica e cimentício.	61
Figura 3. 6 - Fluxograma do processo de produção das argamassas.....	63
Figura 3. 7 - Moldes utilizados para os revestimentos: (a) removido e (b) mantido até o final dos ensaios.	65
Figura 3. 8 - Processo de produção dos revestimentos (a) Separação e pesagem do material; (b) preparo e aplicação da argamassa e (c) revestimento no estado fresco e endurecido armazenado em câmara climática.....	66
Figura 3. 9 - Determinação da densidade no estado fresco	67
Figura 3. 10 - Ensaio da mesa de consistência (a) moldagem; (b) início e (c) finalização do ensaio.....	69
Figura 3. 11 - Procedimento de realização da absorção total.....	69
Figura 3. 12 - Ensaio de retração: (a) moldagem dos corpos de prova; (b) corpos de prova desenformados e (c) corpo de prova posicionado no aparelho comparador.	70
Figura 3. 13 - Ensaio de resistência à tração na flexão (a) moldagem; (b) corpos de prova e (c) momento do rompimento.	71
Figura 3. 14 - Ensaio de resistência à compressão (a) metades dos corpos de prova e (b) momento do rompimento na prensa.	72
Figura 3. 15 - Cachimbo para ensaio de absorção.....	73
Figura 3. 16 - Realização do ensaio de resistência de aderência à tração	74
CAPÍTULO 4	
Figura 4. 1 - Curvas granulométricas dos agregados	78
Figura 4. 2 - Granulometria a laser sem ultrassom	79
Figura 4. 3 – Comparativo de granulometria a laser: com e sem a utilização de ultrassom	79
Figura 4. 4 - Finos (a) Agregado Reciclado Misto e (b) Agregado Reciclado Cimentício.....	80
Figura 4. 5 - Teor de material pulverulento dos agregados.....	81

Figura 4. 6 - Porosidade de grão do agregado reciclado cimentício	82
Figura 4. 7 – Absorção de água dos agregados em função do teor de finos dos agregados	83
Figura 4. 8 - Relação entre módulo de finura e índice de vazios não compactado.....	85
Figura 4. 9 - Imagens dos agregados obtidas por meio de lupa estereoscópica.....	86
Figura 4. 10 – Ensaio de inchamento dos agregados	88
Figura 4. 11 - Absorção de água do agregado em função do coeficiente de inchamento médio ..	89
Figura 4. 12 - Volume ocupado pela fração dos constituintes das argamassas no estado plástico	90
Figura 4. 13 - Relação água/cimento em função do teor de finos das argamassas	91
Figura 4. 14 - Correlação entre densidade do agregado e densidade da argamassa.....	91
Figura 4. 15 - Densidade da argamassa em função da relação água/materiais secos.....	92
Figura 4. 16 - Retração das argamassas ao longo do tempo	93
Figura 4. 17 – Retração aos 28 dias em função da umidade crítica	95
Figura 4. 18 - Retração aos 28 dias em função da relação água/cimento	95
Figura 4. 19 - Absorção de água por imersão da argamassa no estado endurecido em função da densidade em massa da argamassa no estado fresco.....	96
Figura 4. 20 – Média e desvio padrão de resistência à tração na flexão das Argamassas.....	97
Figura 4. 21 - Resistência Média à Compressão das Argamassas	98
Figura 4. 22 - Forma de ruptura dos corpos de prova no ensaio de resistência de aderência à tração.....	101
Figura 4. 23 - Novas formas de ruptura com a utilização de chapisco (a) interface argamassa-chapisco e chapisco-bloco; (b) argamassa (c) interface argamassa-chapisco e argamassa e (d) interface chapisco-bloco.....	102
Figura 4. 24 – Resistência de aderência dos revestimentos em função do fator de empacotamento dos agregados.....	103
Figura 4. 25 - Resistência de aderência à tração em função da relação água/materiais secos	103
Figura 4. 26 - Absorção de água do revestimento ao longo do tempo medida pelo método do Cachimbo	104

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2. 1 - Percentual dos resíduos gerados conforme dados obtidos por Grigoli (2000)	24
Tabela 2. 2 - Indicadores de geração de resíduos em edifício de alto padrão na cidade de Goiânia (GONÇALVES, 2013).....	24
Tabela 2. 3 - Indicador de geração de resíduos para uma obra de habitação de interesse social em Trindade - GO obtido por Gonçalves (2013)	25
Tabela 2. 4 - Resultados para índice de absorção de água de agregados reciclados e naturais.....	30
Tabela 2. 5 - Massa específica para os agregados reciclados produzidos por diversos autores....	31
Tabela 2. 6 - Média, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação dos valores de massa específica dos agregados utilizados por diversos autores.	32
Tabela 2. 7 - Limites mínimos para resistência de aderência à tração (ABNT, 1996).....	40
Tabela 2. 8 - Levantamento de resultados de vários autores referentes à resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa contendo RCD.....	40

CAPÍTULO 3

Tabela 3. 1 - Caracterização do cimento	54
Tabela 3. 2 - Caracterização química e física da Cal	55
Tabela 3. 3 - Ensaios realizados para avaliação dos substratos.	55
Tabela 3. 4 - Resultados para massa seca, absorção no ambiente e absorção de água total do bloco cerâmico	56
Tabela 3. 5 - Caracterização dos Agregados	59

CAPÍTULO 4

Tabela 4. 1 - Percentual de Composição dos Agregados Reciclados.....	75
Tabela 4. 2 - Nomenclatura adotada para os agregados utilizados	76
Tabela 4. 3 - Resultados da caracterização dos agregados.....	76
Tabela 4. 4 - Resultados de interação entre as partículas.....	84
Tabela 4. 5 - Resultados da análise por imagem dos agregados	87
Tabela 4. 6 - Características das argamassas no estado fresco.....	90
Tabela 4. 7 - Média dos resultados de absorção por imersão das argamassas no estado endurecido	96
Tabela 4. 8 - Resultados médios de Resistência de Aderência à tração dos revestimentos de argamassa	99

Tabela 4. 9 - Comparativo entre os valores obtidos e as faixas determinadas pela NBR 13281 (ABNT, 2005)	105
---	-----

APÊNDICE A

Tabela A 1- Teor de umidade e índice de inchamento dos agregados.	120
Tabela A 2- Média dos resultados de análise morfoscópica por faixa granulométrica das amostras de grãos.	120

APÊNDICE B

Tabela B 1 - Resultados individuais para a resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas.....	122
Tabela B 2 - Resistência à compressão aos 28 dias (resultados individuais).....	122
Tabela B 3 - Média dos valores de retração individuais para as argamassas.....	123

APÊNDICE C

Tabela C 1 - Valores individuais para a Resistência de aderência à tração para os revestimentos produzidos com agregado ANat1 aplicados em base cerâmica com solução de cal.....	124
Tabela C 2 - Valores individuais para a Resistência de aderência à tração para os revestimentos produzidos com agregado ANat3 aplicados em base cerâmica com solução de cal.....	125
Tabela C 3 - Valores individuais para a Resistência de aderência à tração para os revestimentos produzidos com agregado AMis3 aplicados em base cerâmica com solução de cal.	126
Tabela C 4 - Valores individuais para a Resistência de aderência à tração para os revestimentos produzidos com agregado AMis3 aplicados em base cerâmica com chapisco.	127
Tabela C 5 - Valores individuais para a Resistência de aderência à tração para os revestimentos produzidos com agregado ACim3 aplicados em base cerâmica com solução de cal.....	128
Tabela C 6 - Resultado de Absorção de água pelo método do cachimbo (ml em função do tempo).....	129

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALV – Alvenaria

ARG – Argamassa

BET – Betuminoso

BCON – Bloco de Concreto

CER – Cerâmica

CON – Concreto

ND – Não Definido

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS.....	20
1.2 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	21
1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	21
CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 HETEROGENEIDADE DOS RESÍDUOS RECICLÁVEIS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	23
2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS.....	26
2.3 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS ...	27
2.4 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS	29
2.4.1 Absorção de água	30
2.4.2 Massa específica.....	31
2.5 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS COM RCD.....	32
2.5.1 Relação água/cimento (a/c)	33
2.5.2 Índice de Consistência (Trabalhabilidade).....	34
2.5.3 Densidade de massa no estado fresco	36
2.5.4 Retração por secagem	36
2.5.5 Resistência mecânica	37
2.6 AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO: RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO.....	39
2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO	48
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	54
3.1.1 Aglomerantes	54
3.1.2 Substrato.....	55
3.1.3 Agregados miúdos.....	58
3.2 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS E REVESTIMENTOS	62
3.2.1 Determinação dos traços de produção das argamassas	62
3.2.2 Produção das argamassas e dos revestimentos.....	63
3.2.3 Caracterização no estado fresco	66

3.2.4	Caracterização das argamassas no estado endurecido	69
3.2.5	Caracterização dos Revestimentos	72
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E Discussão.....		75
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....		75
4.1.1	Granulometria	77
4.1.2	Teor de material pulverulento	80
4.1.3	Absorção de água	81
4.1.4	Interação entre as partículas	83
4.1.5	Análise morfoscópica.....	85
4.1.6	Coeficiente de Inchamento e Umidade Crítica	87
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO		89
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO		92
4.3.1	Retração.....	92
4.3.2	Absorção por imersão	96
4.3.3	Resistência Mecânica	97
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS.....		98
4.4.1	Resistência de Aderência à Tração	99
4.4.2	Absorção de água pelo método do cachimbo.....	104
4.5 CLASSIFICAÇÃO GERAL DAS ARGAMASSAS E REVESTIMENTOS.....		105
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		106
5.1 CONCLUSÕES.....		106
5.1.1	Caracterização dos agregados	106
5.1.2	Argamassas no estado fresco	107
5.1.3	Argamassas no estado endurecido	108
5.1.4	Caracterização dos revestimentos	109
5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS		110
REFERÊNCIAS		112
APÊNDICE A CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS		120
APÊNDICE B ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....		122
APÊNDICE C REVESTIMENTOS		124

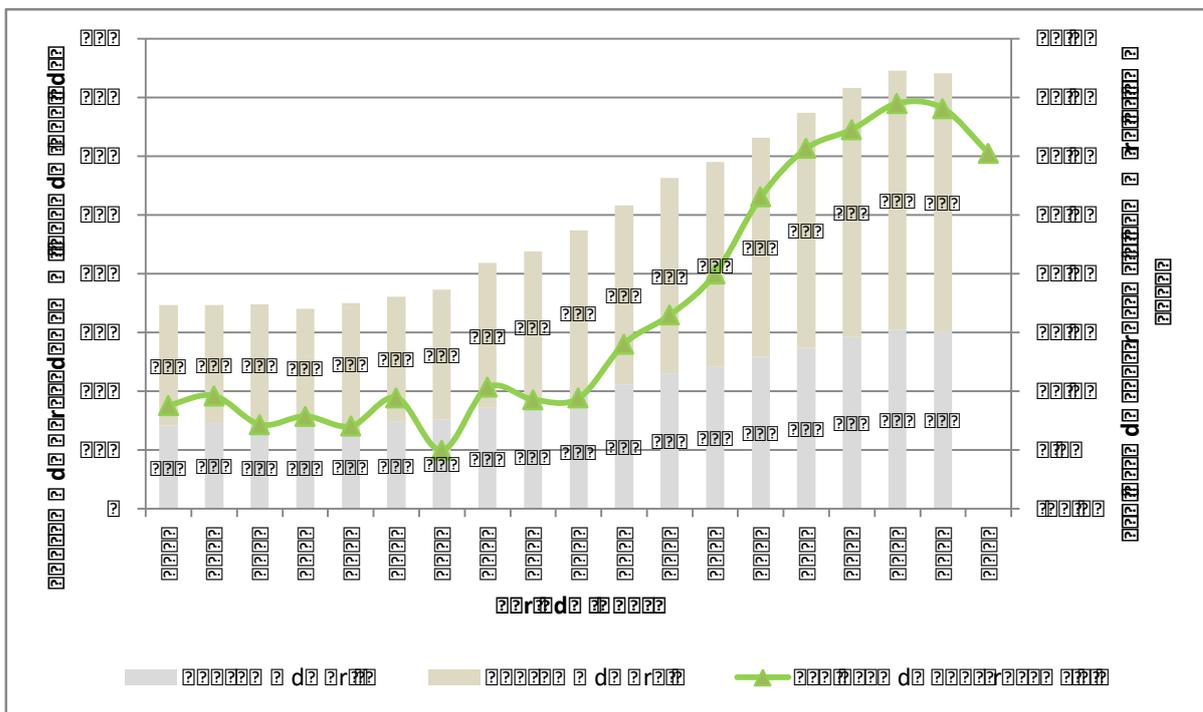
CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A construção civil está entre as atividades que mais exploram recursos naturais não renováveis e é uma das maiores produtoras de entulho no mundo. Mesquita (2012) afirma que, no Brasil, o setor é um dos grandes consumidores de matérias-primas naturais (estimativa entre 20% e 50% do total), que são necessárias para produção de praticamente todos os insumos da construção civil.

Na gama de recursos naturais extraídos para a indústria da construção civil, Ferreira e Pereira (2009) afirmam que os agregados (areia e pedra britada) são os materiais de base mineral mais consumidos e, portanto, os mais significativos em termos de quantidades produzidas no mundo. Um levantamento² considerando a evolução da construção civil e o consumo de agregados ao longo dos últimos anos no Brasil é apresentado na Figura 1. 1.

Figura 1. 1 - Consumo de agregados e evolução da construção civil no decorrer do tempo



² Os dados foram compilados pela autora e obtidos através dos sites: www.ibge.gov.br; www.anepac.org.br e www.cbic.org.br, referentes, respectivamente, ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC) e Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), com acesso em 24 de abril de 2016.

É possível perceber que o crescimento da construção civil (de 2006 a 2013) foi acompanhado, naturalmente, pelo aumento no consumo de agregados e, apesar da notável recessão vivida atualmente, a extração de recursos naturais pela indústria da construção ainda é elevada, o que mantém a necessidade de racionalizar o uso e buscar materiais alternativos, com vistas a diminuir os custos e o impacto ambiental desse extrativismo.

Além do grande consumo de materiais não renováveis, segundo dados levantados pela ABRELPE (2013), de todos os resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados diariamente no Brasil, 62% são Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Na região centro-oeste o percentual de RCD em relação aos RSU é ainda mais elevado, atingindo 65,78% (SEMARH, 2014).

A grande quantidade de RCD não provoca apenas impactos ambientais, mas também perdas de recursos para o gerador, além de trazer prejuízos ao setor público que arca com os custos de disposição final e, em alguns casos, transporte desses resíduos (GONÇALVES; BRANDSTETTER, 2013).

Um dos fatores que podem justificar o grande volume de resíduos provenientes da indústria da construção é o fato de, até o ano de 2002, no Brasil, as políticas públicas priorizarem o abastecimento de água e a coleta de esgotos, sem tornar o setor responsável pela destinação e reaproveitamento dos resíduos por ele gerados.

A gestão e manejo de resíduos da construção e demolição foram disciplinados no país pela Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2002). As legislações recentes, que regram o saneamento básico - Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007) e instituem a política nacional para os resíduos sólidos - Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) incorporam as definições da resolução nº 307 na estrutura de regras para o saneamento, estabelecendo diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos, dentro os quais os da construção civil.

De acordo com Angulo, Zordan e John (2001), nos países em desenvolvimento, a reciclagem de resíduos como materiais de construção ainda era tímida no final do século XX e início do XXI, principalmente devido à falta de conhecimento, ao preconceito e a falta de incentivo por parte do poder público. Entretanto, diante do aumento da consciência ambiental, do elevado consumo de matéria prima não renovável e do surgimento de leis e resoluções, que versam sobre os resíduos de construção e demolição (RCD) e sujeitam as empresas a elaborar um

plano de gerenciamento de resíduos sólidos, surgiram e foram aprimorados estudos, podendo ser citados os trabalhos de Pinto (1999), Miranda (2000; 2005), Angulo (2005), Leite (2007), Corinaldesi e Moriconi (2009), Silva *et al.* (2010), Neno (2010), Ulsen (2011), Jiménez *et al.* (2013) que visam o reaproveitamento destes materiais, incorporados à própria indústria da construção.

Esses estudos estão suprindo a carência de informações sobre as completas características do RCD, que pode ser originado do processo inerente à produção ou por problemas decorrentes de inadequações diversas, seja do material e/ou durante a aplicação.

Ulsen (2011) verificou que a maior parte do resíduo gerado na época não tinha nenhum tipo de reaproveitamento, sendo descartado em aterros ou locais de bota-fora, muitas vezes irregulares (ANGULO, 2002). De acordo com Celestino (2013), isso ocorre principalmente devido à dificuldade de reaproveitamento e reciclagem, quando não é adotado um plano de gestão conciso, onde os RCD sejam previamente segregados por categorias dentro do próprio canteiro.

A utilização mais consolidada dos resíduos de Construção e Demolição é a produção de agregados para composição de base e sub-base de pavimentos, sendo esta bastante difundida na Europa; a Holanda, por exemplo, recicla até 95% de todo resíduo gerado pela indústria da construção (MIRANDA, 2005). Outro uso convencional dos agregados reciclados é como agregado graúdo em concretos sem função estrutural, inclusive no Brasil, regulamentado pela NBR 15116 (ABNT, 2004).

A produção de agregados graúdos a partir do RCD, por meio de moagem, gera grande quantidade de resíduos com pequena granulometria que, em muitos casos, continua a ser descartado de maneira irregular (ULSEN, 2011). Alguns trabalhos estudaram o emprego desse material como agregado miúdo em argamassas, dentre os quais se destacam os seguintes: Levy e Helene (1995), Miranda (2000, 2005), Bavaresco (2001), Miranda e Selmo (2006), Corinaldesi e Moriconi (2009), Silva *et al.* (2011), Neno (2010), Lapa (2011), Jiménez *et al.* (2013), Malta, Silva e Gonçalves (2013), Martínez *et al.* (2013), Ledesma *et al.* (2014).

Na utilização dos agregados reciclados em argamassas os autores oscilam entre apresentar vantagens e desvantagens, muitas vezes obscuras diante do volume de informações estudadas

que podem envolver argamassas simples e mistas; de assentamento e de revestimento (paredes, pisos e tetos); com e sem utilização de aditivos (plastificantes e incorporadores de ar). Por isso, ainda há a necessidade de estudos aprofundados com definições de critérios para a utilização de RCD nas argamassas de revestimentos, correlacionando exclusivamente as características dos agregados com as propriedades das argamassas e o desempenho dos revestimentos, definindo o que deve ser controlado no momento da escolha dos resíduos.

Visando ampliar as soluções para reaproveitamento de RCD e sua confiabilidade, este trabalho se propõe a estudar as argamassas simples de revestimento de parede, sem a utilização de aditivos, com substituição total de areia natural por agregado miúdo reciclado de forma a se obter resultados concisos quanto à influência desse material no desempenho dos revestimentos.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é determinar a viabilidade técnica da substituição total de agregado natural por agregado reciclado (RCD) no preparo de argamassas de revestimento.

Como objetivos específicos têm-se:

- Verificar a eficiência do peneiramento dos agregados para remoção de finos;
- Estabelecer a influência do tipo de agregado reciclado (constituição e origem do resíduo e granulometria após a moagem) nas propriedades das argamassas e dos revestimentos;
- Verificar quais características dos agregados, com base em uma ampla caracterização, são mais significativas em influenciar as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido; e
- Estabelecer os principais parâmetros dos agregados reciclados que exercem influência no desempenho dos revestimentos de argamassa.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Neste capítulo (primeiro) é exposta a pesquisa desenvolvida, situando o leitor quanto ao contexto geral, justificativa da importância, os objetivos geral e específicos, a estruturação a dissertação e as delimitações da pesquisa.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, na qual será discutido o estado da arte para produção de agregados com utilização de RCD e sua aplicação na produção de argamassas, com foco principalmente nas argamassas de revestimento, apresentando os dados obtidos por diversos autores que estudaram o tema.

A metodologia está detalhada no terceiro capítulo, contendo informações dos materiais utilizados, com as respectivas caracterizações, método de produção do agregado, demonstração dos ensaios realizados, tanto com as argamassas (no estado fresco e no estado endurecido) quanto nos revestimentos produzidos.

No quarto capítulo são discutidos os resultados obtidos, buscando relações entre as propriedades dos agregados e das argamassas produzidas, em diversas características e propriedades tais como consistência, densidade, trabalhabilidade, retração e resistência de aderência com a utilização de RCD.

As conclusões e reflexões sobre o tema, com sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 5.

Encerrando-se a dissertação são expostas as referências utilizadas e os apêndices, que apresentam os resultados individuais, média, desvio padrão e coeficiente de variação para os ensaios realizados nos agregados, nas argamassas no estado endurecido e nos revestimentos.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa limita-se a analisar a influência do agregado reciclado de RCD nas propriedades de argamassas a ser utilizadas em revestimentos de paredes, sem compromisso de avaliação de argamassas de qualquer outro tipo. O estudo avaliou agregado reciclado misto e cimentício da região de Goiânia-GO, não sendo avaliados agregados reciclados de outras composições ou regiões.

O único substrato utilizado foi blocos cerâmicos da região metropolitana de Goiânia, não se verificando o comportamento dos revestimentos aplicados em estruturas ou outros materiais.

O preparo do substrato limitou-se à solução com cal ou chapisco produzido no traço 1:3 (cimento e areia natural de rio), não estudando a aplicação sem nenhum tipo de preparo ou com outros métodos alternativos para melhoria da resistência de aderência.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão dos trabalhos publicados por diversos autores quanto à produção e utilização de agregados reciclados para aplicação em argamassas. O foco principal é quanto às argamassas de revestimento, entretanto foram coletados dados das pesquisas que avaliaram a incorporação dos agregados miúdos reciclados em vários tipos de argamassas.

A melhor forma de iniciar o estudo é com uma breve avaliação da composição e heterogeneidade dos agregados reciclados, passando por uma análise dos métodos utilizados atualmente para a produção dos agregados. Prossegue-se, então a revisão, com o estado da arte da utilização dos agregados reciclados na produção de argamassas.

São avaliados os resultados de diversos pesquisadores em gráficos e tabelas, elaborados pela autora desta dissertação, comparando os valores obtidos seguindo três linhas principais: propriedades dos agregados reciclados em comparação com a areia natural; características e propriedades das argamassas e avaliação da resistência de aderência dos revestimentos produzidos com diferentes teores de substituição de areia natural por RCD.

2.1 HETEROGENEIDADE DOS RESÍDUOS RECICLÁVEIS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A composição do RCD pode abranger metais, concretos, plásticos, papéis, materiais isolantes, madeiras, blocos, cerâmicas, solos, gesso e outros e podem ser provenientes das atividades de construção (obras residenciais, comerciais, industriais, obras de arte etc), reforma, demolição ou até mesmo limpezas de terreno.

A quantidade de resíduos em cada obra depende tanto da personalidade de cada administrador (forma de coordenação de equipes e controle de materiais) quanto das condições de construção de cada obra e suas especificidades (projeto padrão, flexibilização, nível de repetição, obras residenciais, comerciais, industriais, mistas etc) (GRIGOLI, 2002).

A aplicabilidade dos RCD na produção de agregados reciclados está ligada à quantidade disponível, origem do material e às propriedades físico-químicas e mecânicas, que variam de

acordo com a composição do resíduo utilizado para sua produção, podendo ser cerâmico, de argamassas, de concreto, betuminoso entre outros.

Ao analisar o resíduo reciclável de diversas construções residenciais brasileiras, Grigoli (2000) chegou aos percentuais, apresentados na Tabela 2. 1, de materiais que compõem o entulho gerado.

Tabela 2. 1 - Percentual dos resíduos gerados conforme dados obtidos por Grigoli (2000)

Entulho	Percentual
Cerâmicas vermelhas	32 %
Argamassas	29 %
Concretos	15 %
Pedras	11 %
Areias	7 %
Vidros/cerâmicas esmaltadas	3 %
Metais	2 %

Gonçalves (2013) produziu indicadores baseados no volume de material perdido no decorrer da obra de um edifício de alto padrão³ na cidade de Goiânia - GO, e obteve os indicadores de geração de resíduos apresentados na Tabela 2. 2.

Tabela 2. 2 - Indicadores de geração de resíduos em edifício de alto padrão na cidade de Goiânia (GONÇALVES, 2013)

Resíduo	Indicador (kg/m²)
Blocos cerâmicos	13,81
Argamassa	7,70
Saco de cimento	0,18
Conduite PVC	0,06
Cano PVC	0,04

Gonçalves (2013) também avaliou uma obra de habitação de interesse social em um condomínio horizontal de casas, na cidade de Trindade - GO, concluindo que o maior índice de perdas por metro quadrado refere-se às argamassas, conforme Tabela 2. 3.

³ A obra é constituída por 39 pavimentos, composta por áreas de uso comum e pavimentos tipos. Os pavimentos tipos são divididos em quatro unidades habitacionais, totalizando 70 apartamentos. Cada unidade possui área total de 260 m² com a opção de escolha entre quatro tipos de plantas e possibilidade de modificações durante a construção. A área do terreno da construção é de 4.591 m² e sua área total construída é de 32.782,94 m²,

Tabela 2. 3 - Indicador de geração de resíduos para uma obra de habitação de interesse social em Trindade - GO obtido por Gonçalves (2013)

Resíduo	Indicador (kg/m²)
Argamassas	12,60
Blocos cerâmicos	10,70
Concretos	5,20
Cerâmica	1,60
Saco de cimento	0,17
Vidros/cerâmicas esmaltadas	0,16
Saco de argamassa	0,16
Caixa de pintura	0,15
Forro PVC	0,10
Perfil do forro	0,02

Em todos os casos, independentemente do tipo de construção, observa-se que o maior volume de resíduos provém de cerâmicas vermelhas e de argamassas. É importante ressaltar que Pinto (1999) já havia feito uma análise quanto à composição do RCD e observou que os materiais que podem ser facilmente vendidos e/ou reaproveitados, como o papel, plásticos, metais e algumas madeiras serão encontrados nos resíduos de construção em quantidades inferiores às realmente geradas.

Os resíduos de cerâmicas vermelhas são oriundos principalmente da quebra de tijolos durante o manuseio, aplicação e cortes para passagem de tubulação. A presença de resíduos de argamassa é originária de perdas provenientes do assentamento de blocos, do chapisco, do emboço, do reboco, regularização de pisos entre outras.

As avaliações do quantitativo de cada parcela de material que constitui o RCD são importantes porque justificam o grande volume de trabalhos utilizando o material predominante nos levantamentos. É importante destacar também que a maior parte dos resíduos de demolição, que podem ser utilizados na composição de argamassas, contém concreto, cerâmica com argamassa aderida e pedaços de argamassa (CORINALDESI, MORICONI, 2009).

Se as maiores perdas nos canteiros de obra coincidem com os materiais oriundos de demolições, pode-se afirmar que, ao fazer uma avaliação para a utilização de resíduos provenientes da construção a mesma análise pode ser válida para os resíduos de demolição (resguardados os

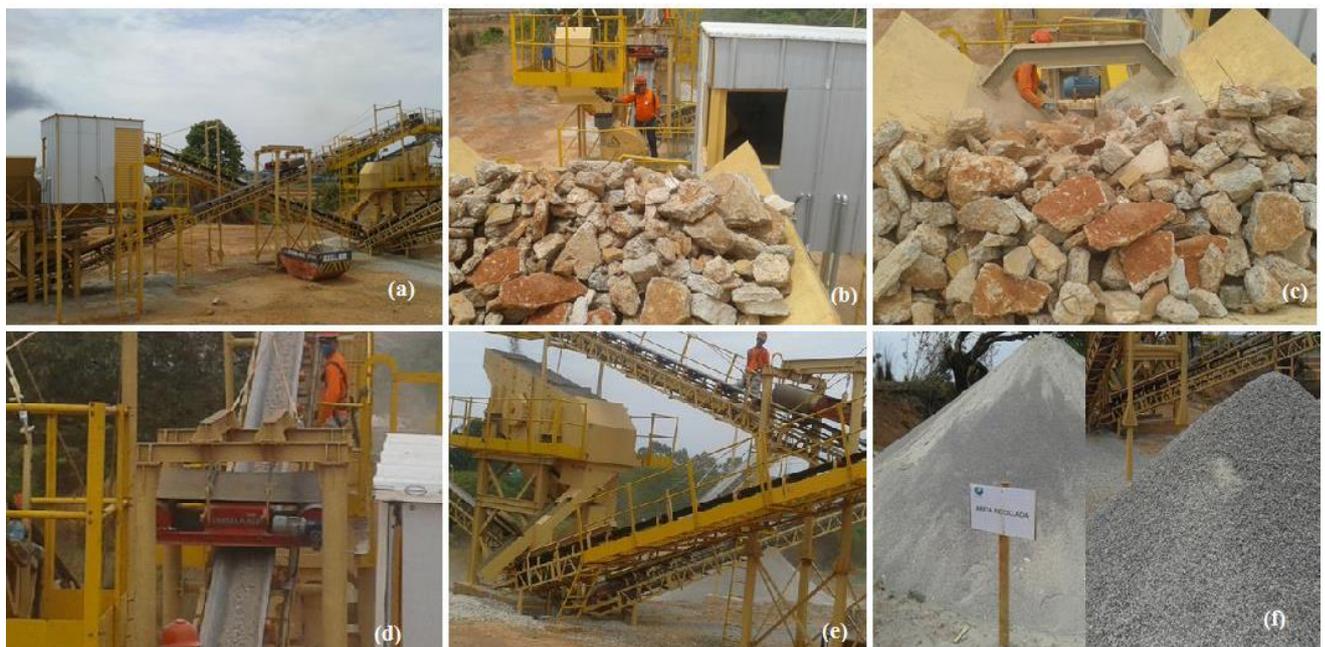
devidos cuidados com a contaminação dos constituintes do RCD). O que poderá facilitar o processo de produção dos agregados, que deverá levar em consideração a origem do agregado reciclado e sua composição predominante.

2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS

O processo de reciclagem envolve basicamente a separação visual (para retirada de plásticos, papéis, madeiras e outros elementos que podem prejudicar a homogeneidade dos agregados), britagem com moinho de mandíbulas ou impacto e peneiramento a seco; a remoção dos componentes metálicos é feita por um extrator de metais ou manualmente, assim como a separação dos materiais orgânicos. Havendo ainda a opção de lavagem ou separabilidade por líquidos densos para remover o material pulverulento (MIRANDA, 2000, 2005; ULSEN, 2011) o qual, quando presente, exige maior quantidade de água de amassamento na argamassa e eleva a relação água/cimento, influenciando a sua trabalhabilidade e as suas propriedades no estado endurecido.

Na Figura 2. 1 é apresentada o modelo de equipamento e descrito o processo de produção, com dois estágios de britagem, e remoção de material metálico por imã, utilizado por uma usina na cidade de Aparecida de Goiânia-GO para a produção de agregado graúdo (Brita 1, Brita 2 e pedrisco) e areia.

Figura 2. 1 - Processo de produção de agregados reciclados em Goiânia. (a) Equipamento; (b) Material bruto; (c) Primeira moagem; (d) Retirada de material metálico; (e) Peneira vibratória e (f) agregado miúdo e graúdo resultante.



Na maioria das usinas de reciclagem citadas na literatura (MIRANDA, 2000; ULSEN, 2011) o foco é a produção de agregados graúdos, principalmente para aplicação em base e sub-base de pavimentos. A fração areia (menor que 4,75 mm), apesar de representar de 40 a 60% em massa de resíduo (ULSEN *et al.*, 2010), é utilizada em bases de pavimentação ou descartada como resíduo da própria reciclagem.

Por isso, mesmo com o desenvolvimento para a utilização de agregados graúdos, ainda há a preocupação e a necessidade de suprir a carência de estudos aprofundados e com definições de critérios objetivos e claros para a utilização desse material como agregado miúdo na construção civil.

2.3 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

Como a maior parte dos resíduos, ao ser processada, gera ainda uma grande parcela de material de baixa granulometria, optou-se por estudar de que forma estes materiais interferem no desempenho de novas argamassas produzidas, contribuindo com dados para a reciclagem de RCD na produção de argamassas.

As propriedades dos agregados reciclados têm uma alta variabilidade, devido à composição do resíduo processado, do equipamento utilizado, da distribuição granulométrica, da absorção de água, entre outros fatores. Estas propriedades são diferentes dos agregados convencionais, e determinam algumas modificações nas condições de aplicação e nas características de argamassas em que forem usados (NENO, 2010).

Levy e Helene (1995) avaliaram as propriedades e desempenho dos revestimentos de argamassa produzidos com RCD. O estudo determinou a contribuição dos vários componentes dos entulhos de obra nas características das argamassas, como a redução do consumo de cimento e cal e ganho de resistência mecânica, verificando que as argamassas produzidas com resíduo cerâmico são melhores que aquelas cujo RCD originário não possui esse componente. Observando que, quando não há a presença de materiais cerâmicos, a capacidade de retenção de água das argamassas fica comprometida. O estudo também comparou a resistência de aderência dos revestimentos em diferentes tipos de bases (bloco cerâmico com e sem chapisco e bloco de concreto).

A análise da trabalhabilidade das argamassas com RCD, variando-se a composição do resíduo e dos traços, por procedimentos racionais de dosagem, foi apresentada por Miranda e Selmo (1999) que prefixaram pelo critério de finos totais plastificantes (fração menor do que 75 μm), diferente das propostas até então, limitadas às argamassas com entulho, em traços empíricos ditados pela prática ou pelo fabricante do equipamento de moagem envolvido, sem fundamento tecnológico de dosagem.

Dando continuidade, Miranda (2000) aplica a dosagem racional de RCD de alvenarias demolidas, em novas argamassas (os RCD continham argamassa, blocos cerâmicos e blocos de concreto em teores variados) mantendo fixo o traço utilizado, concluindo, em relação à resistência de aderência à tração, que os revestimentos de argamassa com entulho reciclado sem utilização de cal e com variações nos teores de agregado/areia natural, podem apresentar aderência ao substrato compatível ou até superior à do revestimento com argamassa mista de referência.

Bavaresco (2001) avaliou diversas argamassas compostas por resíduos, o teor de substituição proposto foi de 50%, 70% e 100%, atingindo valores de resistência à compressão superiores aos da argamassa de referência.

Utilizando a variação da proporção dos materiais que compõe o agregado reciclado de RCD (composto de argamassa, cerâmica e concreto), Miranda (2005) apresentou parâmetros para reduzir a variabilidade dos resultados nas argamassas de revestimento, determinando propriedades a serem controladas durante a fabricação do agregado reciclado e aplicação das argamassas produzidas, mantendo-se fixo o teor de 100% de agregado reciclado.

Ao estudar argamassas e concretos com diferentes teores de substituição de agregado natural por reciclado (0%, 25%, 50%, 75%, 100%), Pedrozo (2008) mostrou que a fração fina de RCD reduz a trabalhabilidade, altera a cinética de hidratação do cimento nos concretos e tem grande influência na retração plástica.

A eficiência da utilização de resíduos de concreto triturado para a composição de argamassas foi afirmada por Neno (2010), a partir do desenvolvimento de pesquisa experimental na qual houve a variação do teor de substituição de agregado natural por reciclado, concluindo que as argamassas produzidas com RCD necessitam de mais água de amassamento, devido à porosidade e maior capacidade de absorção de água dos RCD, superiores às do agregado convencional. No

estado endurecido as argamassas, com incorporação de resíduos provenientes da trituração do concreto, apresentaram uma maior resistência mecânica quando comparadas às argamassas de referência.

Ulsen (2011) demonstrou a possibilidade de melhoria das propriedades das argamassas no estado fresco, reduzindo a porosidade dos agregados reciclados por meio de atrição das partículas, que desagrega a pasta de cimento aderida nos grãos, gerando produtos com distribuição granulométrica e morfologia semelhante à do agregado natural.

Ao produzir argamassas variando-se o teor de substituição de agregado natural por resíduos de material misto de argamassa e cerâmica (5, 10, 20 e 40% em volume), avaliando as propriedades no estado fresco e no estado endurecido, Jiménez *et al.* (2013) concluíram que não houve uma alteração significativa nas propriedades estudadas, exceto quanto à trabalhabilidade e a densidade, o que não significou prejuízos para a utilização do material, quando comparado à argamassa de referência.

A partir dos trabalhos realizados, alguns dos quais o conteúdo foi apresentado anteriormente neste capítulo, é possível perceber uma repetitividade de ensaios com concordância ou divergência entre os resultados, o que estimula a avaliação geral das propriedades, na busca de um padrão que pode ser aplicado para restringir ou regular o uso dos agregados reciclados.

Para confirmar a possibilidade de correlações, com base nos trabalhos já publicados, foi realizada uma coletânea dos dados de diversos autores, nacionais e internacionais, cujos resultados são apresentados nos tópicos seguintes.

2.4 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS

As propriedades disponíveis dos agregados reciclados, para compilação e avaliação, são a absorção de água e a massa específica dos agregados, fornecidas por diversos autores, tabeladas, comparadas entre si e apresentadas a seguir.

2.4.1 Absorção de água

A absorção de água é uma das características que mais influenciam a utilização dos agregados reciclados, visto que se a absorção não for considerada, além da redução da relação a/c total, haverá uma diminuição substancial da trabalhabilidade do material (NENO, 2010).

Quanto mais absorvente for o agregado maior será a necessidade de acréscimo de água na mistura, entretanto, não é toda a água adicionada que influenciará nas resistências obtidas, uma vez que parte da água ficará retida nos agregados até a hidratação dos compostos cimentícios, podendo funcionar como uma cura interna para a argamassa (JOICHEM, 2012).

Na Tabela 2. 4 são apresentados os resultados obtidos por diversos autores, para o índice de absorção dos agregados provenientes da moagem do RCD.

Tabela 2. 4 - Resultados para índice de absorção de água de agregados reciclados e naturais.

Tipo de Agregado	Absorção (%)	Fonte
Areia de quartzo	3,10	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Concreto	7,10	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Misto (alv, asfáltico, con)	8,80	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Cerâmico	16,20	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Areia de quartzo	0,79	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	9,00	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (alv, arg, con)	16,35	Malta, Silva e Gonçalves (2013)
Argamassa	5,00	Miranda (2005)
Bloco de Concreto	5,50	Miranda (2005)
Misto (arg, cer, con)	7,00	Miranda (2005)
Cerâmico	11,50	Miranda (2005)
Areia de quartzo	3,70	Pedrozo (2008)
Misto (arg, cer)	10,60	Pedrozo (2008)

Os agregados reciclados tendem a absorver mais água que os agregados convencionais, em todos os casos. Destaca-se que os agregados compostos essencialmente de cerâmica ou que contém esse material são os que possuem maior absorção de água. Ulsen (2011), Lima (2013), Calcado (2015), dentre outros, sugerem que a alta absorção dos agregados é proveniente de uma camada de argamassa porosa aderida aos mesmos, devendo ser avaliada a influência do material aderido e da parcela cerâmica nas propriedades das argamassas produzidas.

Miranda e Selmo (1999) verificaram que o bloco cerâmico, ao ser triturado, apresenta um maior teor de partículas finas, que eleva a área específica do material e, conseqüentemente, sua capacidade de absorção que depende da quantidade, espécie e tamanho das partículas de cada constituinte do resíduo.

A recomendação de Miranda (2005), Buttler (2003) e Jochem (2012) é que, devido à absorção de água dos agregados reciclados, durante a mistura dos materiais, o agregado seja colocado em contato com o cimento somente após estar saturado, para que se evite a absorção do cimento diluído na água por parte do agregado reciclado.

2.4.2 Massa específica

A massa específica dos agregados é de grande importância, visto que, em associação com a massa unitária fornece informações a respeito da interação entre as partículas, fator de empacotamento, porosidade e índice de vazios. Na Tabela 2. 5 são identificados os valores de massa específica dos agregados produzidos por diversos autores.

Tabela 2. 5 - Massa específica para os agregados reciclados produzidos por diversos autores.

Tipo de Agregado	Massa específica (g/cm³)	Fonte
Areia natural de rio	2,60	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Cerâmico	2,13	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	2,09	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Concreto	2,11	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Areia de quartzo	2,63	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	2,14	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Areia de quartzo	2,59	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Cerâmico	2,06	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Misto (conc, alv, bet)	2,29	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Concreto	2,38	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Areia média de rio	2,67	Calcado (2015)
Misto (arg, con)	2,45	Calcado (2015)
Areia de quartzo	2,62	Malta, Silva e Gonçalves (2013)
Misto (alv, arg, con)	2,46	Malta, Silva e Gonçalves (2013)
Areia natural	2,60	Assunção, Carvalho e Barata (2007)
Misto (arg, cer, con)	2,48	Assunção, Carvalho e Barata (2007)
Areia de quartzo	2,61	Pedrozo (2008)
Misto (arg, cer)	2,51	Pedrozo (2008)
Areia média de rio	2,59	Levy e Helene (1997)
Cerâmico	2,52	Levy e Helene (1997)
Argamassa	2,51	Levy e Helene (1997)
Argamassa	2,62	Miranda (2005)
Bloco de Concreto	2,64	Miranda (2005)
Misto (arg, bcon, cer)	2,65	Miranda (2005)
Cerâmico	2,71	Miranda (2005)

Conforme se observa na Tabela 2. 5, não há diferenças significativas entre a massa específica dos agregados, independentemente do tipo de RCD utilizado, entretanto, apesar da proximidade dos valores, a tendência geral quando se compara os valores de referência com os agregados reciclados é que haja uma redução, conforme demonstrado na Tabela 2. 6, onde também se percebe pequena variação entre os agregados naturais, quando comparados entre si e, mesmo a variação sendo superior para os agregados reciclados, ainda há uma homogeneidade dos valores.

Tabela 2. 6 - Média, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação dos valores de massa específica dos agregados utilizados por diversos autores.

Todos os resultados	
Média (g/cm ³)	2,47
Desvio Padrão	0,21
Coeficiente de Variação	8,4%
Agregados “referência”	
Média (g/cm ³)	2,61
Desvio Padrão	0,03
Coeficiente de Variação	1,0%
Agregados reciclados	
Média	2,40
Desvio Padrão	0,22
Coeficiente de Variação (g/cm ³)	9,1%

Ao avaliar conjuntamente os dados de absorção e massa específica, infere-se que os agregados reciclados podem possuir uma maior porosidade, por serem mais absorventes e mais leves (desconsiderando o volume de vazios), confirmando as afirmações de Miranda (2000), Corinaldesi (2009), Corinaldesi e Moriconi (2009) e Machado (2014).

2.5 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS COM RCD

As argamassas, tanto de revestimento quanto de assentamento, apresentam alterações em diversas propriedades devido à incorporação de agregados reciclados, provenientes da moagem de RCD. Foram avaliadas as seguintes características, no estado fresco: relação água/cimento, o índice de consistência (indicativo de trabalhabilidade) e a densidade de massa; no estado endurecido comparou-se a retração, a absorção por capilaridade e a resistência mecânica.

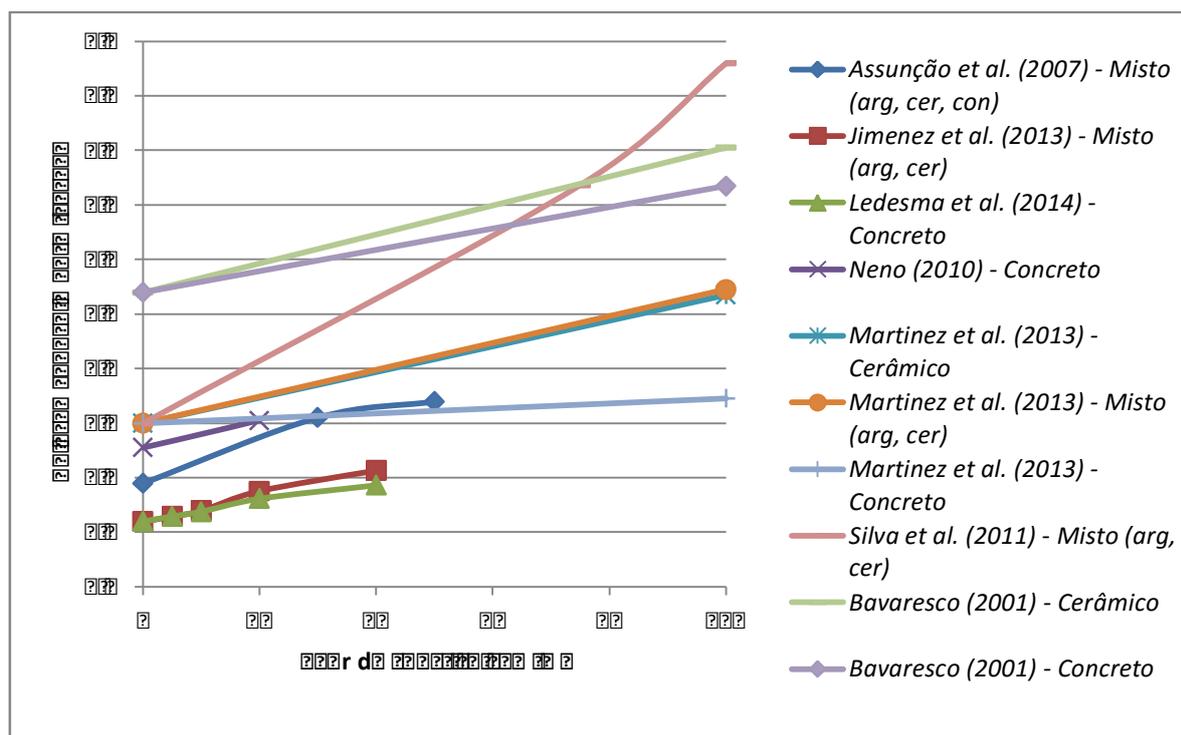
2.5.1 Relação água/cimento (a/c)

Na produção de argamassas a água é essencial por proporcionar características aglomerantes aos ligantes hidrófilos, sendo determinante na consistência no estado fresco e no processo de endurecimento. Para Machado (2014), a quantidade de água é dependente da superfície específica dos agregados, tipo de ligante, traço utilizado, entre outros fatores intrínsecos à utilização prevista da argamassa.

A relação água/cimento é importante porque está intimamente relacionada às propriedades no estado fresco e endurecido, tais como consistência (trabalhabilidade), resistência à compressão, resistência à tração, grau de fissuração, retração, dentre outros.

Na Figura 2. 2 são mostradas as diversas relações água/cimento obtidas pelos autores que desenvolveram argamassas com a utilização de agregados reciclados em função do teor de substituição adotado.

Figura 2. 2 - Relação água/cimento em função do teor de substituição dos agregados



Observa-se que, para todos os casos, há um acréscimo na relação água/cimento, com o aumento do teor de substituição, o que corrobora a afirmação de que os agregados reciclados possuem uma maior absorção, quando comparados à areia natural.

O fato dos agregados reciclados absorverem mais água justifica o incremento na relação água/cimento, que pode ultrapassar 100%, como obtido por Silva *et al.* (2011). Miranda (2005), Buttler (2003), Jochem (2015) e Neno (2010) sugerem que os agregados sejam saturados previamente, antes da adição do cimento, conseguindo uma argamassa com características próximas das que apresentam as misturas correntes, preparadas com relações a/c semelhantes, para uma mesma consistência.

Outro ponto importante que pode levar ao acréscimo da relação água/cimento é a quantidade de finos presentes nos agregados reciclados (cerca de 20 vezes superior ao agregado convencional, de acordo com Machado (2014)), oriundos do processo de fabricação. Miranda e Selmo (1999) confirmaram que argamassas com traços variáveis de 1:6 à 1:10 com teor de finos totais⁴ (inferiores a 75 µm) prefixado em 19% apresentam resultados satisfatórios quanto à plasticidade, adesão ao substrato e desempenho. Além disso, a adoção do teor água/materiais secos fixo em 24%, para traços entre 1:7 e 1:10 não trouxe prejuízos para a trabalhabilidade, apesar de ser possível verificar diferenças quanto à densidade de massa, consistência e retenção de água.

É importante observar que quanto mais finos os agregados, maior a superfície específica e maior a quantidade de água de amassamento necessária, logo o excesso de água acrescido (evaporável) traduz-se em um aumento de poros (MACHADO, 2014), o que pode prejudicar o desempenho das argamassas no estado endurecido.

2.5.2 Índice de Consistência (Trabalhabilidade)

A consistência se refere à facilidade com que a argamassa se deforma sob a ação de cargas. Esta característica está diretamente relacionada ao comportamento interno das partículas, que varia de acordo com a quantidade de pasta aglomerante existente ao redor dos agregados. A argamassa é classificada quanto à consistência em seca, plástica ou fluida (CARASEK, 2010).

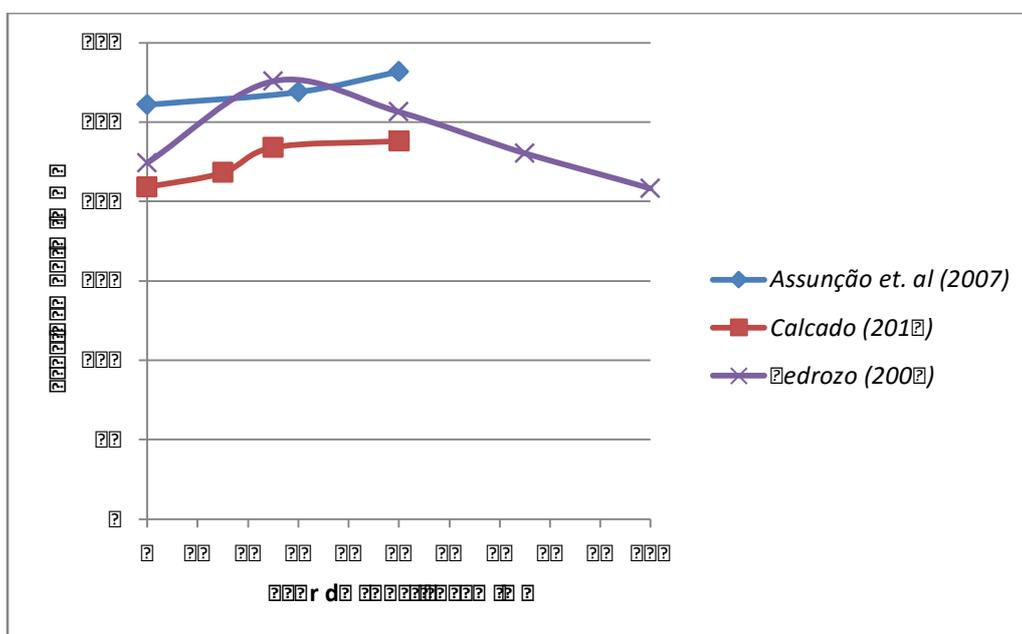
A trabalhabilidade das argamassas é medida indiretamente através de uma correlação com a consistência da argamassa. Esta consistência é normalmente medida por meio dos ensaios de mesa de espalhamento (*flow table*) e de penetração de uma esfera padrão (*dropping ball*) (SILVA *et al.*, 2005).

⁴ A fração de finos totais, também chamada de finos totais plastificantes, inclui a contribuição de todos os componentes da argamassa (cimento, agregado miúdo e adições plastificantes) que possuem dimensão de partícula inferior a 75 µm. Todos esses materiais contribuem para a plasticidade das argamassas, independentemente de serem aglomerante, adição plastificante ou inertes (MIRANDA; SELMO, 1999)

O índice de consistência pode ser reduzido quando se mantém constante a relação água/ cimento para a mistura e aumenta-se o teor de agregado reciclado, devido à maior coesão da argamassa, conforme demonstrado no trabalho de Malta, Silva e Gonçalves (2013). Entretanto, a incorporação crescente de agregados reciclados exige uma maior demanda de água para se atingir a consistência desejada, principalmente em relação às misturas com resíduo cerâmico e de concreto que possuem uma quantidade considerável de material pulverulento (MIRANDA, 2000; LIMA, 2013; CORINALDESI, 2009; CORINALDESI e MORICONI, 2009; OLIVEIRA, 2011). Outro fator que pode influenciar na redução da consistência é a presença de partículas angulosas.

Na Figura 2. 3 é retratada a tendência dos resultados do teste do ensaio de espalhamento para as argamassas com utilização de RCD nos trabalhos em que esse valor não foi pré-fixado.

Figura 2. 3 - Tendência de espalhamento em função do teor de substituição



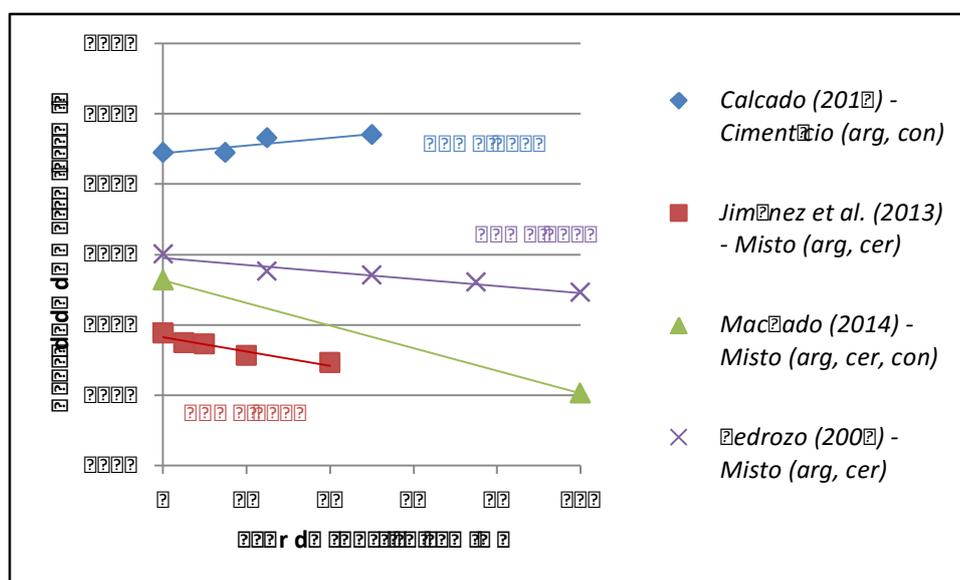
De acordo com os resultados obtidos para as argamassas, é notório que não há variações significativas da consistência em função do teor de substituição, visto que os autores variaram a relação água/cimento para a manutenção da trabalhabilidade, o que é justificado pelas alterações de porosidade e absorção de água dos agregados.

Outros autores (CORINALDESI; MORICONI, 2009; JIMÉNEZ *et al.*, 2013; LEDESMA *et al.*, 2014) mantiveram fixo o índice de consistência para as argamassas, o que parece ser uma alternativa válida para a produção dos revestimentos sem prejuízos decorrentes das propriedades dos diferentes materiais.

2.5.3 Densidade de massa no estado fresco

Densidade de massa da argamassa no estado fresco é a relação entre a massa e o volume de material. Quanto menor for o seu valor, mais leve será a argamassa e menor o esforço empregado na aplicação, podendo aumentar a produtividade do serviço. A densidade de massa está ligada diretamente à massa específica dos materiais constituintes, principalmente do agregado, e ao teor de ar incorporado. Os resultados obtidos pelos autores foram representados na Figura 2. 4.

Figura 2. 4 – Densidade de massa das argamassas no estado fresco em função do teor de substituição



Como se observa, a tendência geral é que haja pequena redução da densidade de massa com o aumento do teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado, isto significa que as argamassas com agregado reciclado são menos compactas em comparação à referência. Esse resultado é compatível com a avaliação da massa específica dos agregados, que é ligeiramente inferior para os agregados reciclados em comparação com os agregados naturais, bem como com os resultados de relação água/cimento (argamassas com maiores teores de RDC exigem maior quantidade de água de amassamento).

2.5.4 Retração por secagem

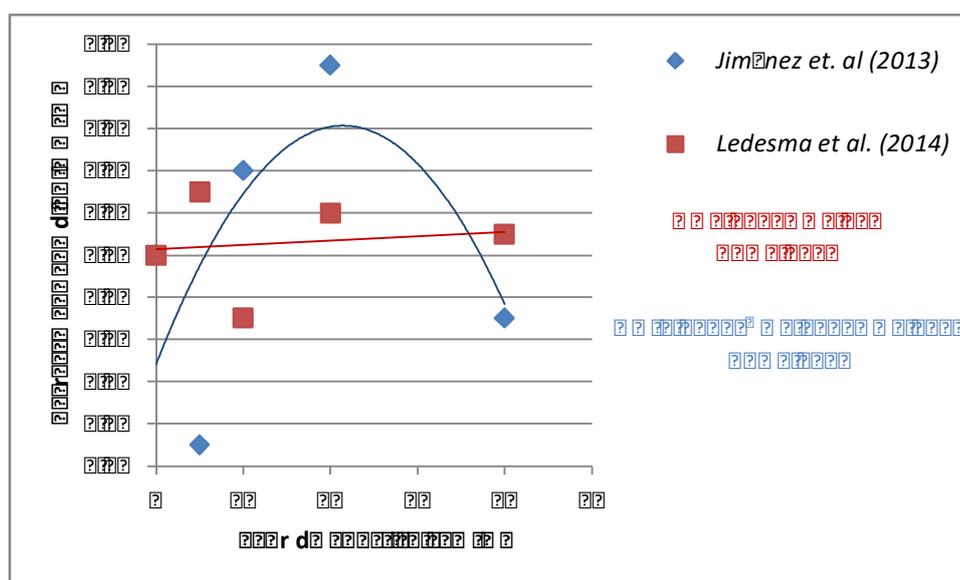
A retração por secagem é um fenômeno característico dos produtos cimentícios, que ocorre devido à variação de volume da pasta aglomerante, principalmente pela evaporação da água excedente, além daquela que reage com os compostos anidros do cimento, cerca de 0,25 a

0,30 kg/kg (MIRANDA, 2005), influenciando no desempenho dos revestimentos de argamassa, especialmente quanto à estanqueidade e à durabilidade.

A retração, assim como as propriedades resistentes da pasta de cimento, depende do tipo de cimento, da idade de hidratação, das condições ambientes de umidade e temperatura e da quantidade de água inicial usada na mistura. Assim, quanto maior for a relação água/cimento, mais susceptível à retração será a pasta. A retração acentuada é caracterizada pelo aparecimento de fissuras mapeadas, com ângulos aproximados de 90° entre si, nos revestimentos.

A retração foi estudada por Jiménez *et al.* (2013) e Ledesma *et al.* (2014) e a tendência dos resultados obtidos são apresentados na Figura 2. 5.

Figura 2. 5 - Retração aos 360 dias em função do teor de substituição



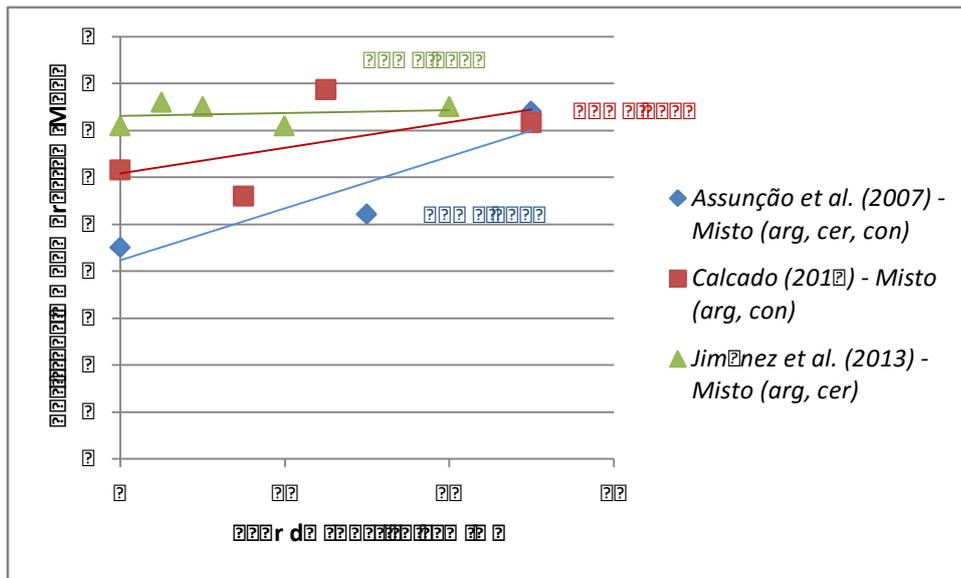
Não houve correlação entre os valores obtidos pelos autores, entretanto, diversos os pesquisadores têm associado os agregados reciclados à alta retração de argamassas (MIRANDA, 2005; CANEDO, BRANDÃO, PEIXOTO FILHO, 2011), sendo assim, cabe uma investigação profunda sobre o tipo e quantidade de agregados reciclados e a retração total das argamassas.

2.5.5 Resistência mecânica

A resistência mecânica diz respeito à propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens e que se traduzem, em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento.

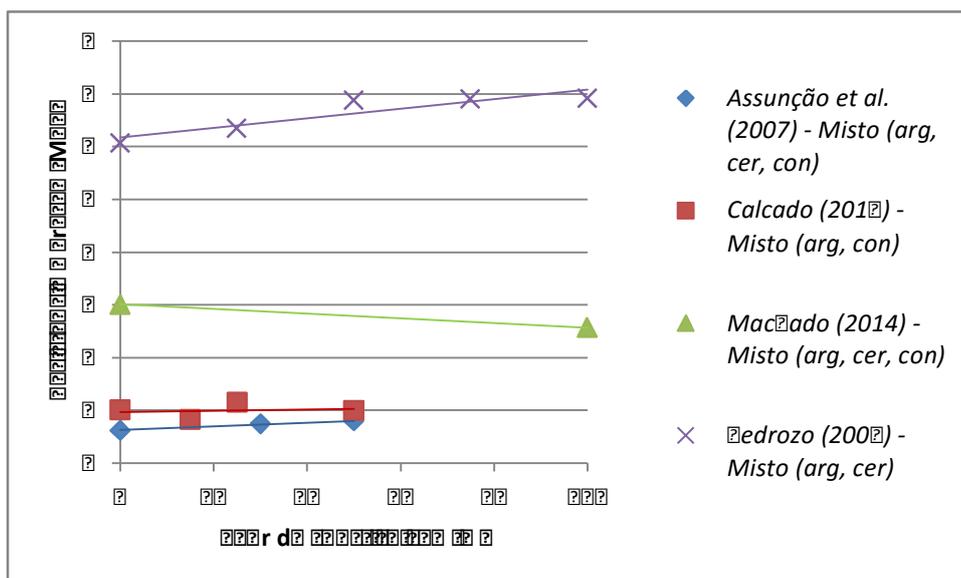
A evolução da resistência à compressão com o aumento no teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado é apresentada na Figura 2. 6, onde é possível perceber que há oscilação dos valores de resistência à medida que se aumentam os teores de substituição dos agregados indicando que, para cada tipo de agregado reciclado, deverá haver um comportamento específico para esta propriedade, não sendo dependente apenas do teor de substituição.

Figura 2. 6 - Evolução da resistência à compressão das argamassas em função do teor de substituição de agregado natural por reciclado



Na Figura 2. 7 verifica-se que a resistência à tração não é influenciada significativamente pelo teor de substituição dos agregados.

Figura 2. 7 - Resistência à tração na flexão das argamassas em função do teor de substituição de RCD



É importante citar as divergências nos valores de resistência mecânica observados nos estudos sobre agregados reciclados, Pedrozo (2008), em seu ensaio com resíduos cerâmicos, observou que, na substituição da areia pelo agregado miúdo cerâmico na proporção de até 50%, a resistência permanece similar à da argamassa com agregado convencional, já para 100% de substituição ocorre pequena redução na resistência. Na mesma linha de raciocínio, Machado (2014) explica que a redução de resistência é causada pelo aumento da porosidade percebida nos corpos de prova confeccionados com os agregados reciclados.

Para Calçado (2015), a substituição do agregado natural pelo reciclado provoca redução do módulo de elasticidade nas argamassas, mas, simultaneamente, há manutenção dos valores de resistência mecânica. Em contrapartida, Assunção, Carvalho e Barata (2007) afirmam que sempre há, na utilização de agregado reciclado, uma melhoria significativa na resistência mecânica, à tração e à flexão.

A partir daí pode-se concluir apenas que a resistência mecânica das argamassas de revestimento produzidas com utilização de RCD é variável e será maior ou menor dependendo do tipo de material reciclado utilizado, da qualidade da moagem, da heterogeneidade das partículas e do teor de substituição. Ressalta-se que, apesar da avaliação desta propriedade, a resistência mecânica não é de extrema relevância no caso específico das argamassas de revestimento, sendo necessário que suporte apenas as movimentações do substrato, os efeitos das variações higrotérmicas e pequenos esforços de compressão axial (JOCHEM, 2012; ASSUNÇÃO; CARVALHO; BARATA, 2007).

2.6 AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO: RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Segundo a NBR 13528 (ABNT, 2010), aderência é a propriedade do revestimento em resistir a tensões normais ou tangenciais atuantes na interface com o substrato. Ou seja, é a principal propriedade em um sistema de revestimento de argamassa, permitindo, por meio da interface argamassa-substrato, absorver e resistir a esforços normais e tangenciais, representa a capacidade do revestimento em manter-se estável, com ausência de fissuração e fixo ao substrato (CARASEK, 2010).

A aderência dos revestimentos é um parâmetro altamente variável, sendo influenciado pelas características da argamassa (materiais, reologia, retenção de água, etc.) e também pelas características do substrato (rugosidade, sucção, porosidade e umidade). Além desses fatores, também a idade (carbonatação e hidratação do cimento); as condições climáticas durante a aplicação, a cura e a vida útil dos revestimentos; e as técnicas de aplicação (mão de obra, pressão, ferramentas e equipamentos) interferem na aderência. (CARASEK *et al.*, 2014).

A resistência de aderência à tração é determinada pelo teste de arrancamento (*pull off test*), normalizado no Brasil pelas normas NBR 13749 (ABNT, 2013), que fixa o valor mínimo para aceitação do revestimento analisado (Tabela 2. 7) e NBR 13528 (ABNT, 2010), similar à EN 1015-12 (CEN, 2000), que determina os procedimentos de execução do ensaio e um número mínimo de doze corpos de prova por ensaio, com oito obtendo o valor mínimo apresentado na Tabela 2. 7.

Tabela 2. 7 - Limites mínimos para resistência de aderência à tração (ABNT, 1996)

Local	Resistência de Aderência (MPa)
Paredes Internas	$\geq 0,20$
Paredes Externas (fachada)	$\geq 0,30$

Na Tabela 2. 8 são apresentados os resultados de resistência de aderência à tração das argamassas produzidas com os agregados reciclados extraídos da literatura.

Tabela 2. 8 - Levantamento de resultados de vários autores referentes à resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa contendo RCD.

Tipo de Agregado	Resistência de Aderência à Tração (MPa)	Relação água/cimento	Substituição (%)	Base	Chapisco	Fonte
Areia de quartzo	0,20	ND	0	Bloco Cerâmico	ND	Antes <i>et al.</i> (2014)
Misto (arg, cer, con)	0,27	ND	20	Bloco Cerâmico	ND	Antes <i>et al.</i> (2014)
Misto (arg, cer, con)	0,26	ND	30	Bloco Cerâmico	ND	Antes <i>et al.</i> (2014)
Misto (arg, cer, con)	0,25	ND	40	Bloco Cerâmico	ND	Antes <i>et al.</i> (2014)
Misto (arg, cer, con)	0,23	ND	50	Bloco Cerâmico	ND	Antes <i>et al.</i> (2014)
Areia natural	0,53	1,08	0	ND	ND	Assunção, Carvalho e Barata (2007)
Misto (arg, cer, con)	0,37	1,32	30	ND	ND	Assunção, Carvalho e Barata (2007)
Misto (cer. e cimentício)	0,56	1,38	50	ND	ND	Assunção, Carvalho e Barata (2007)
Areia natural	0,22	1,78	0	Bloco Cerâmico	Sim	Bavaresco (2001)
Cerâmico	0,26	2,31	100	Bloco Cerâmico	Sim	Bavaresco (2001)

Tabela 2. 8 - Levantamento de resultados de vários autores referentes à resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa contendo RCD. (CONTINUAÇÃO).

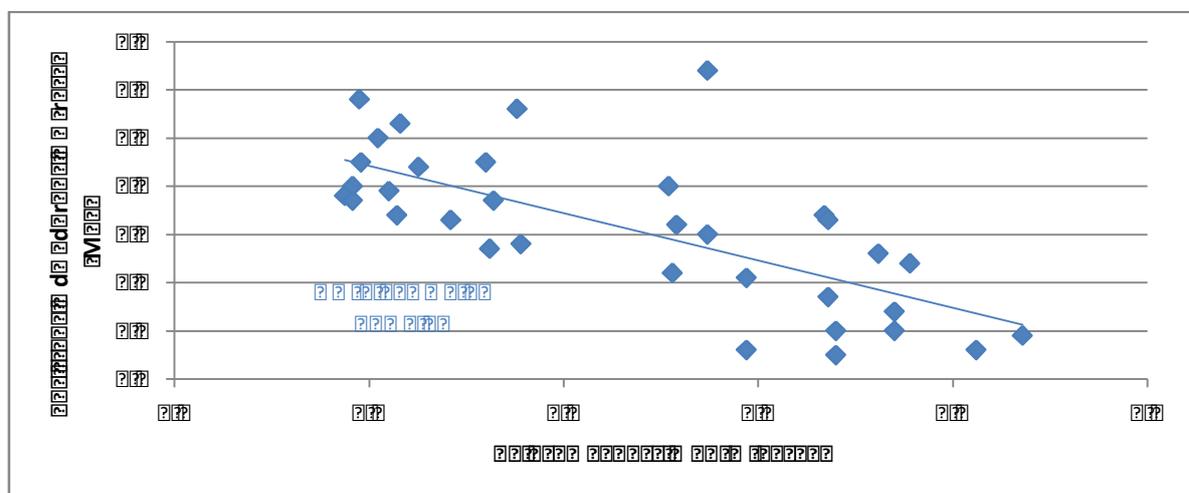
Tipo de Agregado	Resistência de Aderência à Tração (MPa)	Relação água/cimento	Substituição (%)	Base	Chapisco	Fonte
Areia de quartzo	0,21	ND	0	Estrutura Concreto	Sim	Canedo, Brandão, Peixoto Filho (2011)
Areia de quartzo	0,25	ND	0	Bloco Cerâmico	Sim	Canedo, Brandão, Peixoto Filho (2011)
Argamassa	0,26	ND	70	Bloco Cerâmico	Sim	Canedo, Brandão, Peixoto Filho (2011)
Argamassa	0,21	ND	70	Estrutura Concreto	Sim	Canedo, Brandão, Peixoto Filho (2011)
Areia média lavada	0,33	ND	0	Bloco Cerâmico	Sim	Garcia, Dias e Alves (2013)
Argamassa	0,38	ND	50	Bloco Cerâmico	Sim	Garcia, Dias e Alves (2013)
Argamassa	0,21	ND	100	Bloco Cerâmico	Sim	Garcia, Dias e Alves (2013)
Areia de quartzo	0,38	0,94	0	Laje de Concreto	Não	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	0,37	0,96	5	Laje de Concreto	Não	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	0,45	0,98	10	Laje de Concreto	Não	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	0,39	1,05	20	Laje de Concreto	Não	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	0,44	1,13	40	Laje de Concreto	Não	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Areia natural	ND	1,87	0	Bloco Cerâmico	Sim	Lapa (2011)
Misto (arg, cer)	0,64	1,87	64	Bloco Cerâmico	Sim	Lapa (2011)
Areia de quartzo (de rio)	0,38	0,94	0	Laje de Concreto	Não	Ledesma <i>et al.</i> (2014)
Concreto	0,40	0,96	5	Laje de Concreto	Não	Ledesma <i>et al.</i> (2014)
Concreto	0,58	0,97	10	Laje de Concreto	Não	Ledesma <i>et al.</i> (2014)
Concreto	0,50	1,02	20	Laje de Concreto	Não	Ledesma <i>et al.</i> (2014)
Concreto	0,34	1,07	40	Laje de Concreto	Não	Ledesma <i>et al.</i> (2014)
Cerâmico	0,24	2,39	100	Bloco Cerâmico	Sim	Levy e Helene (1995)
Misto (arg, bcon)	0,30	1,87	100	Bloco Concreto	Sim	Levy e Helene (1995)
Misto (arg, cer)	0,33	2,18	100	Bloco Concreto	Sim	Levy e Helene (1995)
Misto (arg, cer)	0,17	2,18	100	Bloco Concreto	Não	Levy e Helene (1995)
Areia natural de rio	0,45	1,30	0	Bloco Concreto	Não	Martínez <i>et al.</i> (2013)
Cerâmico	0,40	1,77	100	Bloco Concreto	Não	Martínez <i>et al.</i> (2013)
Concreto	0,28	1,39	100	Bloco Concreto	Não	Martínez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	0,32	1,79	100	Bloco Concreto	Não	Martínez <i>et al.</i> (2013)
Areia de quartzo (de rio)	0,33	1,21	0	Bloco Cerâmico	Não	Neno (2010)
Concreto	0,27	1,31	20	Bloco Cerâmico	Não	Neno (2010)

Tabela 2. 8 - Levantamento de resultados de vários autores referentes à resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa contendo RCD. (CONTINUAÇÃO).

Tipo de Agregado	Resistência de Aderência à Tração (MPa)	Relação água/cimento	Substituição (%)	Base	Chapisco	Fonte
Areia de quartzo (de rio)	0,22	0,73	0	Bloco Cerâmico	Sim	Oliveira e Cabral (2011)
Misto (arg, cer, con)	0,26	0,74	10	Bloco Cerâmico	Sim	Oliveira e Cabral (2011)
Misto (arg, cer, con)	0,42	0,74	20	Bloco Cerâmico	Sim	Oliveira e Cabral (2011)
Misto (arg, cer, con)	0,26	0,75	30	Bloco Cerâmico	Sim	Oliveira e Cabral (2011)
Misto (arg, cer, con)	0,80	0,76	40	Bloco Cerâmico	Sim	Oliveira e Cabral (2011)
Misto (arg, cer, con)	0,37	0,76	50	Bloco Cerâmico	Sim	Oliveira e Cabral (2011)
Areia de quartzo (fina)	ND	1,30	0	ND		Silva <i>et al.</i> (2011)
Misto (arg, cer)	0,21	1,97	75	Bloco Cerâmico	Sim	Silva <i>et al.</i> (2011)
Misto (arg, cer)	0,14	2,35	75	Bloco Cerâmico	Sim	Silva <i>et al.</i> (2011)
Misto (arg, cer)	0,10	2,35	75	Bloco Cerâmico	Não	Silva <i>et al.</i> (2011)
Misto (arg, cer)	0,10	2,20	75	Bloco Cerâmico	Sim	Silva <i>et al.</i> (2011)
Misto (arg, cer)	0,06	1,97	75	Bloco Cerâmico	Não	Silva <i>et al.</i> (2011)
Misto (arg, cer)	0,05	2,20	75	Bloco Cerâmico	Não	Silva <i>et al.</i> (2011)
Misto (arg, cer)	0,09	2,68	100	Bloco Cerâmico	Sim	Silva <i>et al.</i> (2011)
Misto (arg, cer)	0,06	2,56	100	Bloco Cerâmico	Não	Silva <i>et al.</i> (2011)

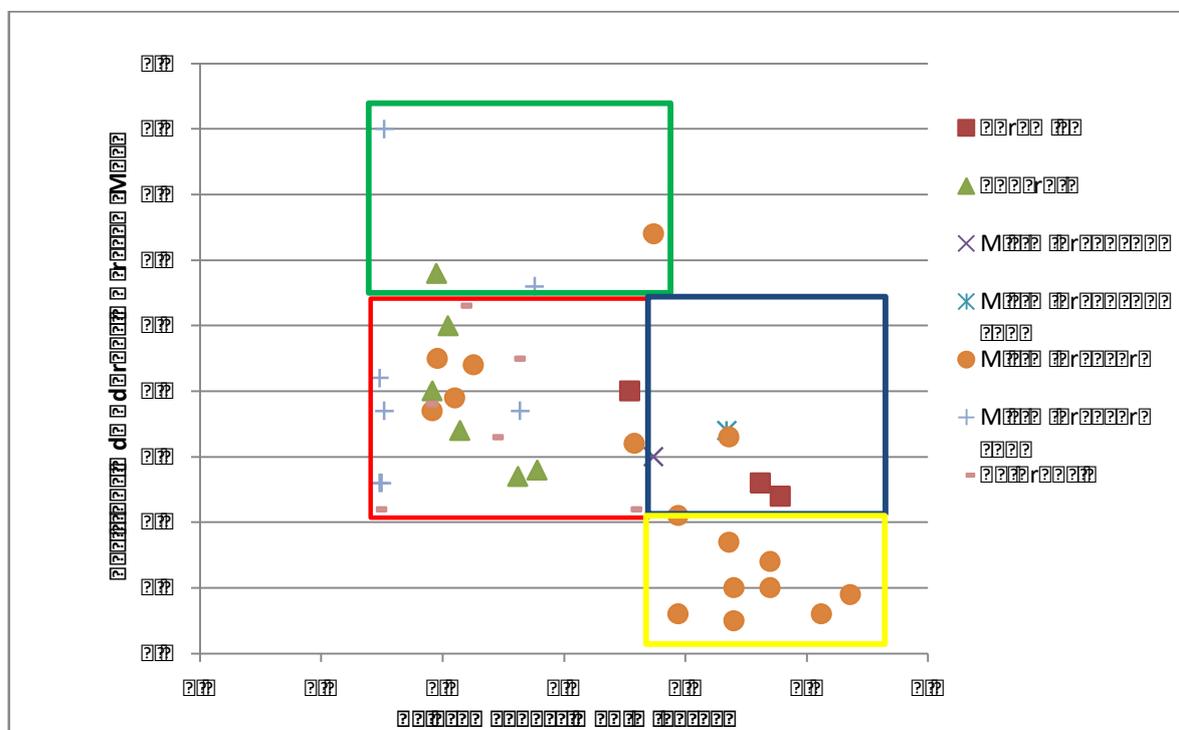
Para o tratamento dos dados, foi realizada, inicialmente uma correspondência de todos os valores de resistência de aderência à tração com a relação água/cimento (Figura 2. 8), observando-se que, de maneira geral, há uma tendência de redução da resistência de aderência à tração com o aumento dessa relação.

Figura 2. 8 - Resistência de aderência à tração em função da relação água/cimento



Para verificar a influência do tipo de RCD e comparar os resultados com as argamassas de referência, os dados foram agrupados quanto à sua composição e na Figura 2. 9 é possível observar esse comparativo.

Figura 2. 9 - Resistência de aderência à tração em função da relação água/cimento



O retângulo vermelho apresentado na Figura 2. 9 indica a área do gráfico na qual estão inseridos os valores obtidos para as argamassas convencionais. Pode-se perceber que a maior parte dos resultados obtidos (59%), independente do tipo e quantidade de substituição do agregado utilizado, tipo de substrato e forma de preparo da base, está dentro desta área, sendo que 42% das argamassas com resíduo estão neste grupo. Além disso, tratando apenas das argamassas com RCD quatro tipos, ou cerca de 10%, apresentaram resistência de aderência à tração superior à referência, mantendo-se constante a faixa de relação água/cimento (retângulo verde).

Existiram também cinco resultados (12%) que apresentaram um aumento na relação água/cimento, mas permaneceram na mesma faixa de resistência de aderência à tração que as argamassas convencionais, ressalta-se que, em 80% desses resultados, há a presença do resíduo cerâmico, individual ou composto por mistura com argamassa, o que justifica o acréscimo da relação água/cimento devido à maior retenção de água desses agregados, que pode auxiliar na penetração das argamassas nos poros do substrato, contribuindo para a manutenção ou

incremento da resistência de aderência à tração (LEVY; HELENE, 1995; BAVARESCO, 2001; NENO, 2010).

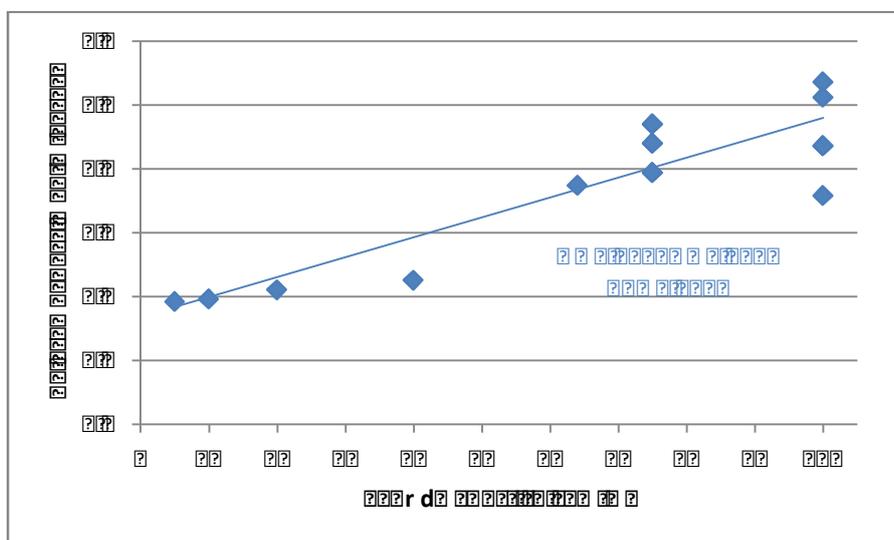
Buttler (2003), ao avaliar agregado graúdo, havia concluído que, nas dosagens em que o agregado reciclado é utilizado na condição semi-saturada (no momento do preparo o agregado é misturado com água antes de acrescentar os demais materiais), a presença de água na superfície do agregado provoca uma retenção de grande quantidade de partículas de cimento ocasionando uma excelente aderência pasta/agregado.

Segundo o autor, o agregado reciclado continuará absorvendo água da mistura fresca, até atingir a condição saturada; quando no estado endurecido, a água que foi absorvida pelo agregado será mobilizada para a matriz de cimento levando a uma “cura interna”, que melhorará as características da matriz cimentícia, hidratando as partículas remanescentes de cimento não hidratado.

Os únicos resultados insatisfatórios, inferiores ao padrão das argamassas convencionais e ao estipulado nas normas brasileiras, referem-se às argamassas compostas de agregado reciclado misto de cerâmica e argamassa, representando 19% das argamassas avaliadas (esses valores são indicados no retângulo amarelo da Figura 2. 9).

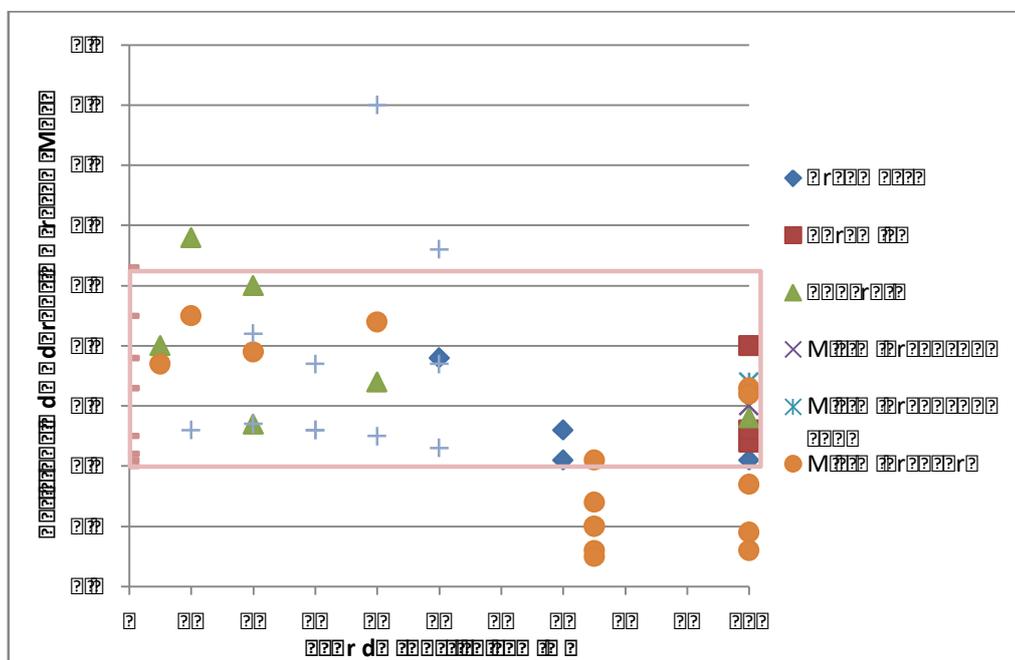
A relação água/cimento mostrou-se diretamente proporcional ao teor de substituição dos agregados reciclados nas argamassas, para os resíduos mistos de argamassa e cerâmica, conforme pode ser observado na Figura 2. 10.

Figura 2. 10 - Relação água/cimento das argamassas em função do teor de substituição (agregado misto cerâmica e argamassa)



Também foi avaliada, para todos os tipos de argamassa produzidas, a influência do teor de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados na resistência de aderência à tração, os resultados são apresentados na Figura 2. 11.

Figura 2. 11 - Resistência de aderência à tração em função do teor de substituição

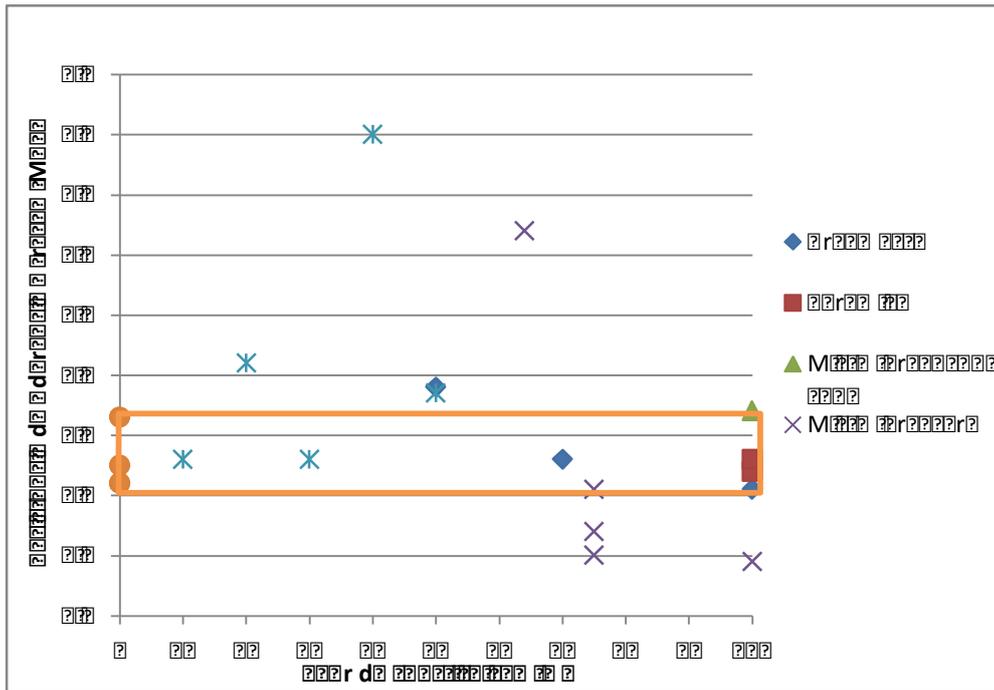


A maioria dos resultados (81%) está contida no intervalo de resistência de aderência obtida para as argamassas de referência e mínimo determinado por norma (retângulo rosa), três resultados (6%) estão acima dos valores encontrados de referência e sete valores (13%) estão abaixo dos encontrados como referência, todos referentes às argamassas produzidas com material misto de argamassa e cerâmica.

Para verificar se há influência da base nos resultados de aderência, quando comparados à referência, foram elaborados gráficos comparando os valores de resistência por tipo de base de aplicação, variando-se o teor de substituição dos agregados.

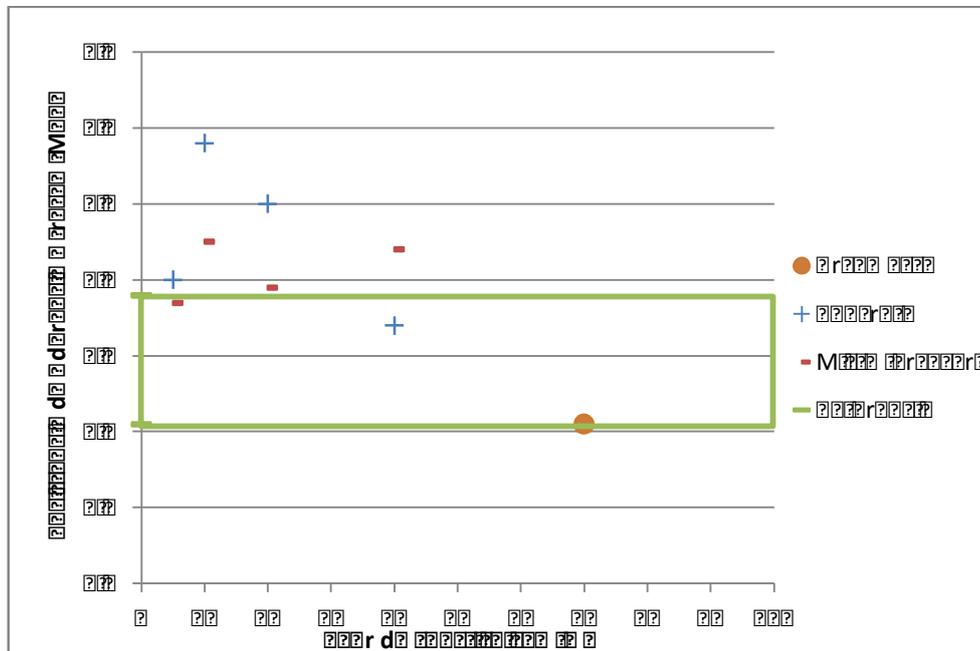
Na Figura 2. 12 foram transcritos os dados referentes à base cerâmica com chapisco, na qual se constatou alta variabilidade de resultados, com a predominância de valores iguais ou acima da referência, exceto para agregados mistos, compostos de argamassa e cerâmica.

Figura 2. 12 - Resistência de aderência à tração em função do teor de substituição (base cerâmica com chapisco)



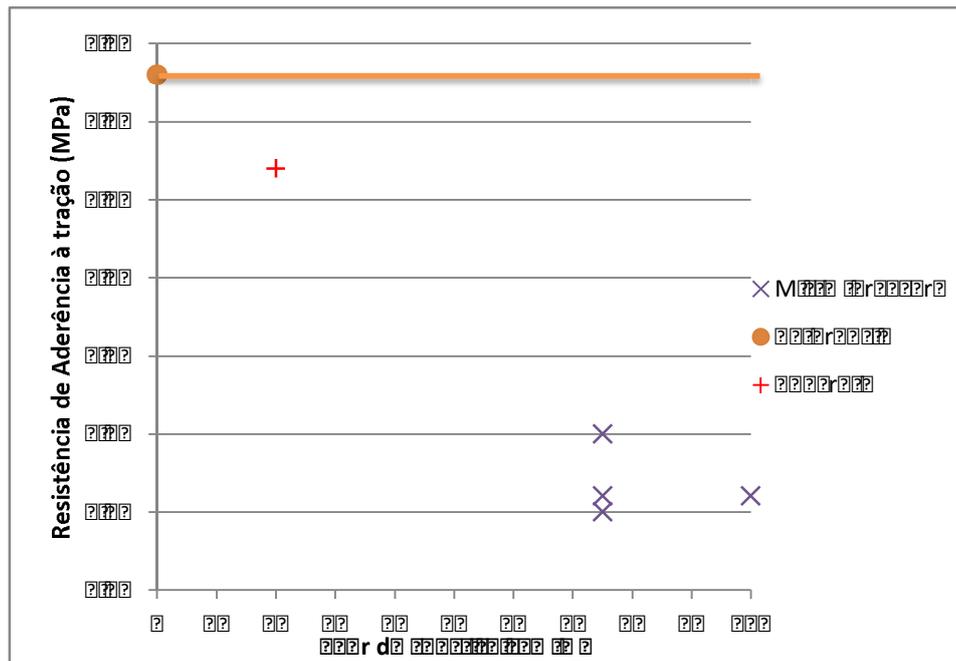
Para base de concreto (Figura 2. 13) há uma manutenção e até superação da resistência de aderência à tração obtida com RCD comparado com os valores da argamassa de referência.

Figura 2. 13 - Resistência de aderência à tração em função do teor de substituição (base estrutura de concreto)



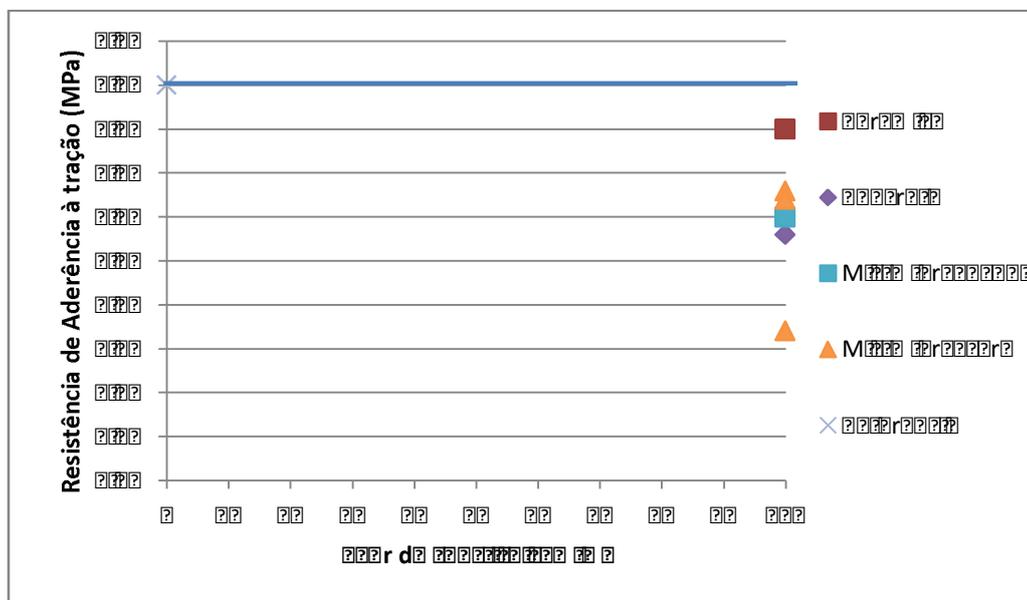
Quando se avalia a base cerâmica sem chapisco (Figura 2. 14) verifica-se que os valores de resistência de aderência à tração das argamassas com RCD são inferiores aos obtidos para as argamassas de referência e à NBR 13749 (ABNT, 2013), exceto para o resíduo de concreto.

Figura 2. 14 - Resistência de aderência à tração em função do teor de substituição (base cerâmica sem chapisco)



Para o bloco de concreto (Figura 2. 15), foram feitos ensaios apenas com 100% de substituição de agregado reciclado e os valores de resistência de aderência à tração são inferiores aos obtidos para as argamassas de referência, apesar de, em sua maioria, atenderem às especificações da NBR 13749 (ABNT, 2013).

Figura 2. 15 - Resistência de aderência à tração em função do teor de substituição (base bloco de concreto)



2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO

Há a necessidade real de reaproveitamento e reciclagem dos resíduos gerados pela construção civil, que é a única atividade que não se responsabiliza pela reciclagem de seus resíduos, o que gera grande percentual, relativo ao total, de resíduos sólidos urbanos em decorrência de suas atividades.

O potencial de reutilização de RCD incorporados a novos produtos, tais como concretos, pavimentações e argamassas já está comprovado por diversos autores, possuindo, inclusive normalizações nacionais e internacionais.

Os agregados produzidos com RCD possuem características diferentes para cada tipo de resíduo utilizado em sua composição. A absorção de água, por exemplo, é superior às dos agregados convencionais, o que se torna muito mais evidente nos agregados que possuem material cerâmico em sua composição.

A massa específica dos agregados reciclados é, em todos os casos, inferior à do agregado natural utilizado como referência pelos autores, o que significa que os agregados naturais são mais compactos e, provavelmente menos porosos que os agregados reciclados, corroborando a avaliação de que os agregados de RCD possuem maior absorção de água, entretanto, do ponto de vista estatístico, não houve diferenças significativas nesta propriedade.

A relação água/cimento, como esperado, foi superior nas argamassas com RCD, em todos os casos, quando comparada à mistura de referência, mesmo nas pesquisas em que os autores acrescentaram aditivos plastificantes às argamassas. Isto poderia levar a acreditar que haveria uma piora nas propriedades das argamassas no estado endurecido, entretanto, esse acréscimo não prejudicou o desempenho dos revestimentos, principalmente no que tange à resistência de aderência à tração que, mesmo quando houve um acréscimo da a/c, manteve equivalência entre a faixa de resistência dos revestimentos de referência, com exceção para as argamassas compostas de resíduo misto de cerâmica e argamassa.

O índice de consistência, que é um parâmetro para determinar trabalhabilidade, não sofreu alterações entre as argamassas com resíduo e as argamassas convencionais, oscilando entre maior e menor consistência de acordo com a variação do teor de substituição. Essa informação indica que a variação da consistência depende, além do tipo de RCD, do traço empregado na mistura e do tipo de moagem realizada no do RCD.

Quando avaliadas quanto à densidade de massa no estado fresco, as argamassas com agregados reciclados apresentaram resultados levemente inferiores às argamassas convencionais, isso pode ser explicado pela menor densidade dos agregados reciclados em comparação com os agregados convencionais.

Não houve conclusões quanto à retração, entretanto, essa propriedade pode ser comparada ao grau de fissuração encontrado nos revestimentos e merece atenção especial de avaliação, visto que Miranda (2005), Canedo, Brandão, Peixoto Filho (2011) e outros, relataram um aumento de fissuras mapeadas, provavelmente oriundas de retração plástica nos revestimentos com RCD estudados.

Os dados de resistência mecânica indicam que não há influência do teor de substituição, sendo primordial o conhecimento e o fornecimento de dados sobre os agregados reciclados (tipo e origem), visto que cada um possui um comportamento específico para estas propriedades.

As argamassas com RCD apresentaram resistência de aderência à tração satisfatória e, em alguns casos, superior ao da argamassa convencional, corroborando a hipótese de que a cura interna proporcionada pela absorção de água dos agregados reciclados pode auxiliar na penetração dos compostos cimentícios no substrato e como cura interna para melhoria das propriedades no estado endurecido. A exceção para este caso foi o agregado composto de argamassa e cerâmica, cujos valores oscilaram bastante entre os trabalhos em que foi utilizado, apresentando em alguns casos o melhor desempenho e em outros o pior.

Além da variação relativa ao tipo de agregado utilizado, constatou-se que a mudança de base influencia, diretamente, a resistência de aderência à tração, visto que a base cerâmica com chapisco e a base em concreto obtiveram os melhores resultados de aderência à tração.

Entretanto, o bloco de concreto e o bloco cerâmico sem chapisco apresentaram resultados inferiores à referência, corroborando a informação de que os substratos mais rugosos possuem maior área de contato com a argamassa aplicada, o que pode incrementar os valores de aderência conseguidos pela hidratação no interior do substrato melhorando as condições de aderência (JOICHEM, 2012).

Diante do exposto, no que tange às argamassas de revestimento, percebe-se uma necessidade de correlacionar as propriedades dos agregados com as características das argamassas no estado fresco e endurecido e suas implicações no desempenho dos revestimentos, principalmente quanto

à aderência e à fissuração devida à retração, principalmente quando há a substituição total da areia natural por RCD.

De forma a preencher esta lacuna do assunto, após a compilação dos dados dos trabalhos anteriores, esta pesquisa se propõe a estudar as propriedades das argamassas e o desempenho dos revestimentos de argamassas produzidos com resíduos, em substituição total da areia natural, avaliando seu comportamento quanto à retração, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, à resistência de aderência à tração e à absorção de água (pelo método do cachimbo), quando aplicado em base de bloco cerâmico.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

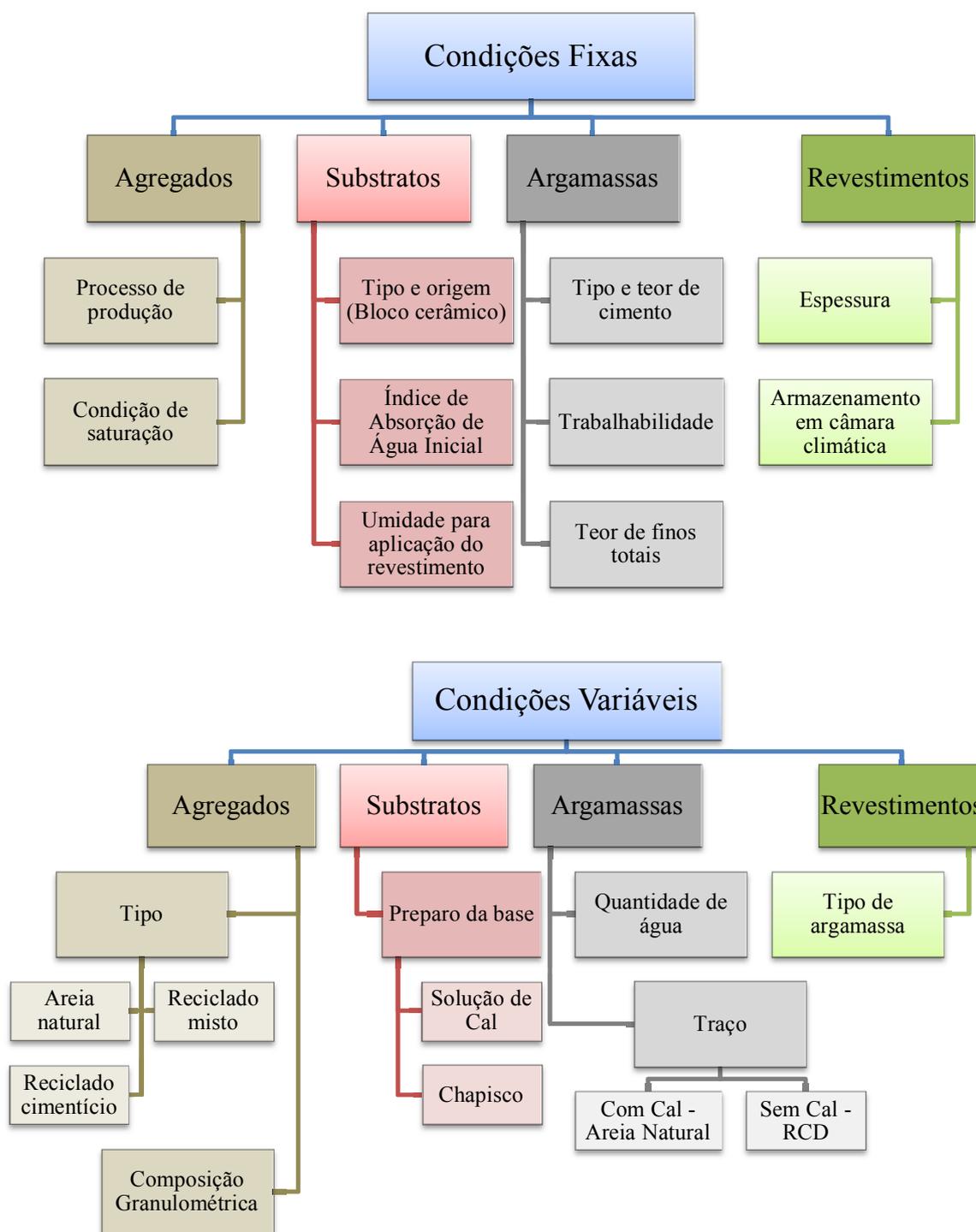
Este capítulo apresenta os materiais e métodos empregados para determinar a influência dos agregados reciclados no desempenho dos revestimentos de argamassa. Para isso, foi realizada caracterização dos agregados, avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco (densidade de massa e consistência) e no estado endurecido (retração, resistência mecânica e absorção de água total), buscando correlacionar os resultados obtidos com a resistência de aderência à tração e absorção pelo método do cachimbo, a fim de estabelecer os fatores intervenientes no desempenho dos revestimentos de argamassa.

De forma a possibilitar o desenvolvimento da pesquisa e manter o padrão de confiabilidade dos resultados, foram mantidos fixos: o tipo de substrato, o índice de absorção de água inicial, a condição de umidade inicial para a aplicação do revestimento de argamassa, o tipo e teor de cimento para a produção das argamassas, a espessura dos revestimentos, o processo de produção dos agregados reciclados e as condições de armazenamento dos corpos de prova (câmara climática), a trabalhabilidade das argamassas (índice de consistência) e o teor de finos totais plastificantes.

Buscando comparar e correlacionar os revestimentos e as argamassas, variou-se o tipo de agregado utilizado (areia natural, reciclado misto (cerâmico e cimentício) e reciclado cimentício), a quantidade de água de amassamento (para manter constante a trabalhabilidade), o traço das argamassas (com objetivo de equilibrar o teor de finos totais plastificantes das argamassas), o preparo do substrato (solução de cal e chapisco convencional).

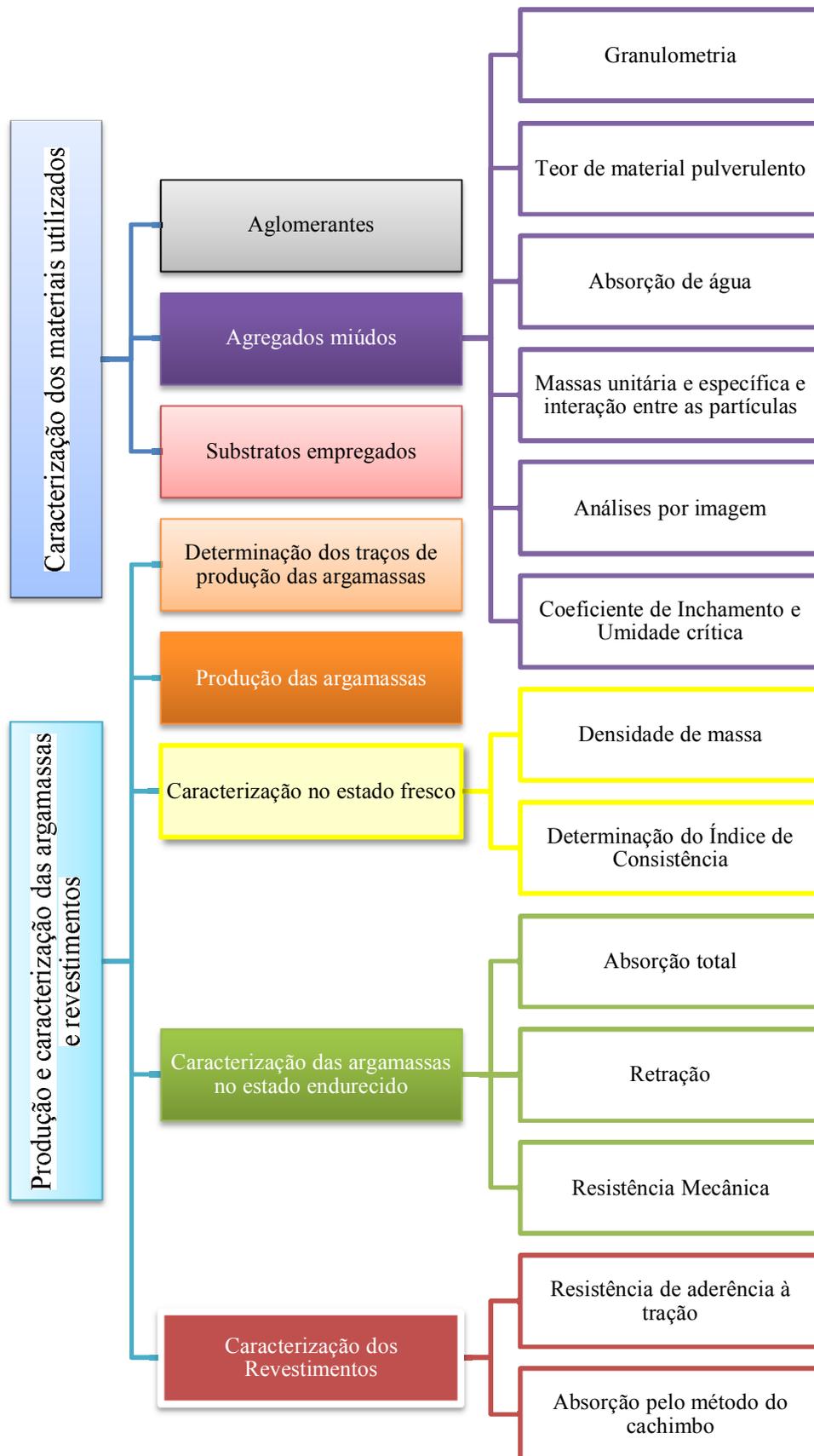
Na Figura 3. 1 é indicado o fluxograma com o resumo geral dos parâmetros do programa experimental, indicando as condições que foram mantidas fixas para todos os experimentos realizados e as variáveis que possibilitaram a comparação entre os resultados.

Figura 3. 1 - Fluxograma apresentando as condições fixas e variáveis do programa experimental



Um fluxograma esquemático do programa experimental utilizado para desenvolver a pesquisa é apresentado na Figura 3. 2. De maneira simplificada, foram seguidas duas vertentes principais: a caracterização extensiva dos materiais que serão utilizados, principalmente os agregados, de forma a embasar e justificar as propriedades das argamassas produzidas e o desempenho verificado nos revestimentos.

Figura 3. 2 – Fluxograma do programa experimental empregado na pesquisa.



3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Serão apresentados os resultados obtidos na caracterização dos aglomerantes e substrato utilizado e os métodos adotados para realizar os ensaios nos agregados utilizados neste trabalho.

3.1.1 Aglomerantes

Foi utilizado o cimento Portland tipo CP II Z-32, que é um cimento comercial popular na região do estado de Goiás, cujas principais características, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 3. 1.

Tabela 3. 1 - Caracterização do cimento

Propriedade	Método	Resultado	Parâmetros ⁵
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23:2001	2,98	ND
Finura Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76:1998	3,54	≥ 2,60
Resíduo na peneira 75 µm (%)	NBR 11579:1991	2,12	≤ 12,00
Resíduo na peneira 45 µm (%)	NBR 12826:1993	10,57	ND
Tempo de início de pega (h,min)	NBR NM 65:2003	3,28	≥ 1,00
Tempo de fim de pega (h,min)		4,19	≤ 10,00
Resistência à compressão (3 dias – MPa)	NBR 7215:1996	27,60	≥ 10,00
Resistência à compressão (7 dias – MPa)		33,80	≥ 20,00
Resistência à compressão (28 dias – MPa)		41,90	≥ 32,00
Teor de MgO (%)	NBR NM 14:2012	3,24	≤ 6,50
Teor de SO ₃ (%)		2,34	≤ 4,00

A cal hidratada foi do tipo CH-I, caracterizada pelo fabricante (Tabela 3. 2) quanto às características físicas e químicas e especificações mínimas exigidas pela NBR 7175 (ABNT, 2003).

⁵ Estabelecidos pela NBR 11578 (ABNT, 1991).

Tabela 3. 2 - Caracterização química e física da Cal

Propriedade		Resultado	Limite (NBR 7175:2003)
Finura (% retida acumulada)	Peneira 600 μm	0,26%	$\leq 0,5\%$
	Peneira 75 μm	9,10%	$\leq 10\%$
Plasticidade		120,75	≥ 110
Anidro Carbônico (CO ₂)		4,05%	$\leq 5\%$
Óxidos de Ca e Mg não hidratados		5,96%	$\leq 10\%$
Óxidos totais na base de não voláteis		97,04%	$\geq 90\%$

3.1.2 Substrato

Para aplicação dos revestimentos foi empregado bloco cerâmico de vedação com furos na horizontal, obtido em olaria da cidade de Goiânia, usualmente utilizado em obras correntes, com dimensões nominais de 9 cm x 19 cm x 29 cm.

As propriedades avaliadas (Tabela 3. 3) foram escolhidas devido à sua relação com a qualidade do bloco e/ou influenciarem na resistência de aderência à tração dos revestimentos e com vistas a permitir a repetitividade e confiabilidade dos resultados obtidos e os procedimentos foram baseados no que determina a NBR 15270-3 (ABNT, 2005).

Tabela 3. 3 - Ensaios realizados para avaliação dos substratos.

Tipo de Característica	Ensaio	Amostra (un)	Local de Realização
Geométrica	Dimensões das faces	414	Labitecc - EECA - UFG ⁶
	Área bruta	414	Labitecc - EECA - UFG
Física	Massa Seca	6	Labitecc - EECA - UFG
	Índice de Absorção d'água (Total)	6	Labitecc - EECA - UFG
	Umidade no ambiente ⁷	6	Labitecc - EECA - UFG
	Índice de Absorção de Água Inicial	414	Labitecc - EECA - UFG

3.1.2.1 Características Geométricas

Com relação às características geométricas, os blocos apresentaram pequenas divergências no tamanho. Para a menor dimensão a média foi de 18,9 cm e coeficiente de variação na ordem de

⁶ Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás.

⁷ A umidade no ambiente não é preconizada pela NBR 15270-3 (ABNT, 2005), e foi realizado para verificar a absorção e retenção de água do bloco no clima Goiano. As amostras foram escolhidas aleatoriamente e tiveram sua massa aferida, posteriormente foram secas em estufa, até massa constante, para cálculo do Índice de Umidade no Ambiente.

1,21%. Na maior dimensão, a variação percentual foi inferior, 0,80%, com média de 28,9 cm. Quanto à área, houve média de 548,15 cm², com coeficiente de variação de 1,73%.

De acordo com a avaliação NBR 15270-1 (ABNT, 2005), o lote seria considerado conforme, visto que a média das dimensões efetivas apresentou desvio inferior a 3 mm em relação às dimensões nominais dos blocos.

3.1.2.2 Características físicas

Para determinação das características físicas, os blocos foram espalhados no laboratório, em local coberto e livre de intempéries, poeira e água, para serem selecionados e ensaiados de forma aleatória, de todos os locais da pilha de blocos recebida.

Para a umidade no ambiente os blocos foram selecionados e pesados em balança com precisão de 0,1g. Em seguida iniciou-se o procedimento para determinação de massa seca, em que os blocos foram colocados em estufa com temperatura constante de $105 \pm 5^\circ \text{C}$, por 24 horas, resfriados à temperatura ambiente e, logo após, tiveram sua massa aferida, determinando a umidade no ambiente e a massa seca dos blocos.

Os mesmos blocos para os quais foi determinada a massa seca foram submersos em água por 24 horas, sendo retirados e, antes da pesagem, foi eliminado o excesso de água com um pano úmido. Os resultados de média, desvio padrão e coeficiente de variação para as três propriedades são apresentados na Tabela 3. 4.

Tabela 3. 4 - Resultados para massa seca, absorção no ambiente e absorção de água total do bloco cerâmico

Propriedade:	Massa Seca (g)	Umidade ambiente (%)	Índice de Absorção d'água - total (%)
Média:	3081	0,4	22
Des. Padrão:	108	0,1	0,43
C. Variação:	3,5%	18,6%	1,89%

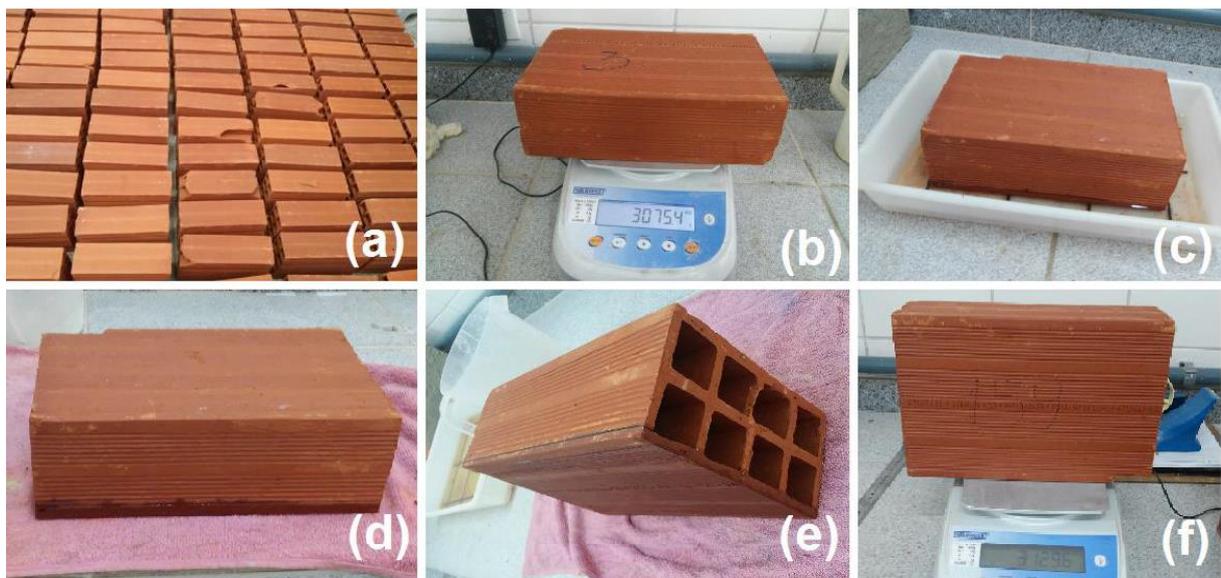
Apesar do alto coeficiente de variação para a umidade ao ambiente, todos os resultados foram inferiores a 0,60%, então, considerar-se-á nula a influência deste teor no desenvolvimento do trabalho.

Quanto ao Índice de Absorção d'água (Total) o valor obtido foi limítrofe da NBR 15270-1 (ABNT, 2005), que determina que os resultados devem estar entre 8% e 22%, portanto os blocos

possuem elevada absorção, entretanto ainda poderão ser utilizados para aplicação dos revestimentos.

Para a realização do ensaio de Índice de Absorção de Água Inicial (AAI), os blocos foram espalhados no pátio do laboratório (Figura 3. 3a), numerados, medidos em suas faces e tiveram sua massa, com umidade ambiente (inferior a 0,60%), aferida (Figura 3. 3b), em balança com precisão de 0,1 g; cada bloco então foi imerso em uma lâmina d'água com altura constante de 5 ± 2 mm, durante um minuto (Figura 3. 3c) com auxílio de um cronômetro, após a retirada o mesmo era colocado por no máximo 2 segundos sob uma toalha previamente umedecida (Figura 3. 3d, Figura 3. 3e) para a retirada do excesso de água e a massa final era imediatamente medida (Figura 3. 3f).

Figura 3. 3 - Descrição do ensaio de absorção inicial (a) corpos de prova espalhados no laboratório; (b) bloco numerado sendo pesado; (c) imersão do corpo de prova em lâmina d'água; (d) retirada do excesso de água; (e) retirada do excesso d'água e (f) pesagem do corpo de prova após a imersão.



Os resultados de absorção inicial variaram entre 9 e 19 g/193,55cm².min, com média de 13,03 g/193,55cm².min (desvio padrão de 1,69 g/193,55cm².min e coeficiente de variação de 13%), para reduzir ainda mais a variação dos blocos e evitar que esta fosse uma variável nos revestimentos produzidos, optou-se por selecionar os blocos com AAI de $12,5 \pm 1,5$ g/193,55cm².min, por ser o intervalo contendo o maior número de blocos (266). Com essa restrição, reduziu-se em mais de 50% o coeficiente da variação dos blocos, que passou a ser de 6%, considerado equivalente e que não exerceria influência nas propriedades dos revestimentos.

3.1.3 Agregados miúdos

Foram utilizados três tipos de agregados: areia natural lavada quartzosa de rio; agregado reciclado misto de cerâmica e material cimentício e agregado reciclado cimentício, sendo os dois últimos provenientes de duas indústrias de reciclagem da região metropolitana de Goiânia-GO, produzidos a partir da moagem de resíduos de construção, por meio de britador de mandíbula com britagem secundária, cuja fotografia é apresentada na Figura 3. 4.

Figura 3. 4 - Vista geral do equipamento de moagem em usina situada na cidade de Aparecida de Goiânia-GO



Os agregados reciclados foram produzidos por duas indústrias que possuem o mesmo equipamento de moagem e processo produtivo. O resíduo misto, foi originário de blocos cerâmicos e telhas e restos de concreto de construções, não houve acréscimo de resíduos de demolição para a produção dos agregados. O agregado cimentício foi originado a partir da moagem de restos de concreto caminhões betoneira de empresas de concretagem da região metropolitana de Goiânia-GO.

Para utilização, os agregados passaram por peneiramento manual, em peneiras com abertura de 3 mm e 1,18 mm, sendo esta última com o objetivo de reduzir o alto teor de finos encontrado no material. Todos os agregados foram caracterizados conforme os ensaios descritos na Tabela 3. 5.

Tabela 3. 5 - Caracterização dos Agregados

Característica	Finalidade	Laboratório	Metodologia
Composição dos agregados	Verificar os percentuais relativos a cada um dos resíduos empregados na composição dos agregados reciclados.	Labitecc - EECA - UFG	Adotada metodologia baseada na análise de composição de resíduos sólidos urbanos.
Composição Granulométrica	Mostrar a distribuição dos grãos constituintes dos agregados, com determinação do módulo de finura e dimensões máximas características.	Labitecc - EECA - UFG	NBR 7211 (ABNT, 2009); NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Granulometria a laser	Verificar a distribuição granulométrica das partículas inferiores a 2 mm.	Laboratório de Geotecnia – EECA - UFG	Ribeiro <i>et al.</i> (2014)
Teor de Material Pulverulento	Determinar a quantidade de material com granulometria inferior a 75 micrômetros	Labitecc - EECA - UFG	NBR NM 46 (ABNT, 2003).
Absorção de água	Determinar o acréscimo de massa dos grãos porosos em relação à massa no estado seco, devido à penetração de água nos poros permeáveis	Carlos Campos Consultoria e Construções e Labitecc - EECA - UFG	NBR NM 30 (ABNT, 2001).
Massa unitária	Determinar a massa que as partículas do agregado ocupam em determinado volume.	Labitecc - EECA - UFG	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	Estabelecer a relação entre a massa do agregado na condição saturado superfície seca e seu volume, excluindo os poros permeáveis.	Carlos Campos Consultoria e Construções e Labitecc - EECA - UFG	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Análise morfológica	Determinar o índice de forma dos grãos a partir de relações entre os diâmetros, perímetro e área dos agregados	Labitecc - EECA - UFG	Mendes (2008), Araújo (2015) e Carasek <i>et al.</i> (2016)
Coefficiente de inchamento e umidade crítica	Determinar a variação do volume aparente dos grãos com a variação de umidade e a umidade a partir do qual o coeficiente de inchamento será constante.	Labitecc - EECA - UFG	NBR 6467 (ABNT, 2006)

Os procedimentos que não são normalizados no Brasil serão descritos a seguir, em detalhes, para explicar a metodologia adotada.

3.1.3.1 Composição dos agregados

Os agregados reciclados foram avaliados por meio de fotografias simples, sem ampliação por lentes, para cada uma das frações granulométricas retidas nas peneiras 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60

mm, 0,42 mm e 0,30 mm. Para as parcelas menores que 300 μm não foi possível a realização da análise devido às distorções da imagem com a aplicação do zoom digital.

As fotografias foram exportadas para o *software* AutoCAD®, onde foram particionadas em quatro quadrantes, selecionando-se dois quadrantes diagonais, contabilizando a área de aproximadamente 300 grãos para cada faixa granulométrica.

Para determinação dos percentuais de cada material considerou-se como parcela vermelha todos os materiais de coloração semelhante a telhas e blocos cerâmicos e, a parcela cinza engloba os materiais semelhantes a pasta de cimento e brita, ou seja, argamassas e concretos. Outros materiais (por exemplo, areia, impurezas e matéria orgânica), por serem de difícil identificação e estarem pouco presentes na amostra (inferior a 0,5% na peneira 2,36 mm) foram desconsiderados.

3.1.3.2 Granulometria a laser

Com o objetivo de verificar o dimensionamento e distribuição das partículas realizou-se granulometria a laser, no Laboratório de Geotecnia da EECA - UFG, com o aparelho granulômetro a laser fabricado pela *Microtrac*, modelo S3500. Cabe salientar que ainda não existe norma brasileira que regulamenta o ensaio. Desta forma, foi utilizada metodologia proposta por Ribeiro, Angelim e Guimarães (2014) em seu estudo para solos tropicais. O ensaio foi realizado em uma amostra de cada agregado utilizado, com grãos passantes na peneira de abertura 2 mm.

Para a areia natural não se utilizou ultrassom (visto que não existem agregações nos grãos) e o índice de refração adotado foi de 1,54 (representativo do quartzo natural). Para os agregados reciclados, que possuem composição mista (incluindo areia, cimento, cerâmica, brita entre outros), foi utilizado índice de refração de 1,81, que anula a influência desse parâmetro no cálculo das dimensões da partícula, sendo realizada análise com e sem ultrassom (devido à possibilidade dos grãos, por serem de material britado e cimentício, se agregarem novamente no momento da execução do ensaio).

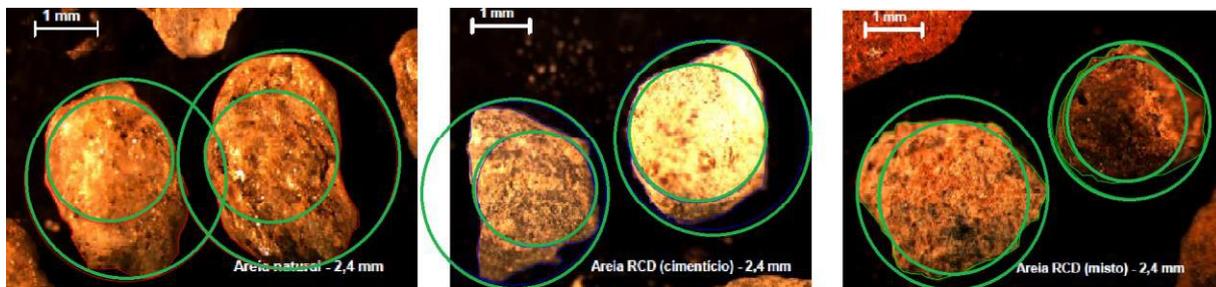
3.1.3.3 Análise morfoscópica

Os grãos foram avaliados por meio de morfoscopia realizada em lupa estereoscópica da marca *Leica Microsystems* modelo MZ12.5 com uma câmera acoplada ao computador. Foram

avaliadas dez amostras de cada uma das faixas granulométricas das peneiras da série normal, além do material retido e passante (fundo) na peneira com abertura 75 μm . Os agregados com dimensões 2,4 mm, 1,2 mm e 0,6 mm foram ampliados 18 vezes; para os grãos com dimensão de 0,3 mm a ampliação foi de 30 vezes e, as partículas de dimensão inferior a 0,15 mm, foram ampliadas em 60 vezes.

A análise das imagens foi realizada por meio do *software* AutoCAD®, em que foram realizadas medidas dos diâmetros da maior circunferência inscrita nos grãos e da menor circunferência que circunscrive os mesmos, além da área projetada do grão e seu perímetro. Na Figura 3. 5 é possível verificar os traçados realizados para a obtenção dos valores da análise.

Figura 3. 5 - Medições realizadas na análise por imagem dos agregados (a) Areia Natural; (b) Agregado de resíduo cimentício (c) Agregado de resíduo misto de cerâmica e cimentício.



Essa avaliação busca aplicar a definição de Rittenhouse⁸ (1943, *apud* Araújo, Bicalho, Tristão, 2015) para esfericidade que, de acordo com o autor, é a relação entre o diâmetro do círculo com uma área igual à projeção da partícula e o diâmetro do menor círculo circunscrito à partícula, podendo variar de 0 a 1; na prática esses valores vão de 0,45 (alongada) a 0,97 (muito esférica).

Essa definição originou parâmetros cujas equações são apresentadas no trabalho de Mendes (2008) e Araújo (2015), e serão utilizadas para caracterização dos agregados calculando-se o índice de forma (equação 3.1), a esfericidade (equação 3.2) e o *f-circle* (equação 3.3) dos grãos empregados nesta pesquisa.

$$IF = \frac{D_2}{D_1} \quad (3.1)$$

⁸ Rittenhouse G. A visual method of estimating two-dimensional sphericity. J Sedim Petrol. 1943;13:79-81

$$\emptyset = \left(\frac{4Ap}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{1}{D_1} \quad (3.2)$$

$$fc = \frac{4\pi Ap}{P^2} \quad (3.3)$$

Onde:

IF = Índice de forma

D_1 = Diâmetro da menor circunferência que circunscreve o grão;

D_2 = Diâmetro da maior circunferência inscrita no grão;

\emptyset = Esfericidade do grão;

A_p = Área projetada do grão;

fc = *f-circle* circunferência do grão;

P = perímetro do grão.

3.2 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS E REVESTIMENTOS

Neste tópico será apresentada a metodologia empregada para determinação dos traços de argamassa e os ensaios e procedimentos realizados para a produção e caracterização das argamassas e dos revestimentos.

3.2.1 Determinação dos traços de produção das argamassas

Para determinação do traço foi levado em consideração o teor de finos das argamassas, após a realização do ensaio de determinação de material pulverulento dos agregados. Inicialmente foi determinado o traço para as argamassas contendo resíduos, fixando-se o teor de cimento em 240 kg/m³, resultado um teor de finos totais plastificantes de 28 ± 2%, para os agregados reciclados, sendo o traço em volume fixado em 1:5,8 (cimento:agregado).

Com o traço definido, para as argamassas com resíduo, adicionou-se cal hidratada – CH-I, nas argamassas produzidas com agregado natural, adotando-se para estas o traço 1:1:5,8 (em volume), mantendo a mesma faixa de teor de finos obtida para as argamassas que contém resíduo. Em função do teor de finos totais plastificantes, as argamassas são classificadas como “gordas” de acordo com a proposição de Miranda e Selmo (1999).

Inicialmente havia o objetivo de produzir argamassas mistas com agregado reciclado, reduzindo o teor de finos do RCD a partir da passagem do material por peneiras com abertura de 1,18 mm, entretanto, essa situação mostrou-se ineficiente, os revestimentos apresentaram grandes fissuras logo após a aplicação das argamassas. Diante disso, para verificar a possibilidade de produção de argamassa com menor teor de finos e comparar o resultado com as demais foi produzido o traço com esse material e sem adição de cal, no traço 1:5,8, em volume, que resultou em um teor de finos total de 19%.

3.2.2 Produção das argamassas e dos revestimentos

A produção das argamassas consistiu na separação e pesagem prévia dos materiais, de acordo com cada traço, imprimação da betoneira e do carrinho de mão utilizados, mistura em betoneira de eixo vertical⁹, colocando-se inicialmente apenas o agregado com uma parcela da água, para a condição de semi-saturação do agregado, conforme recomendação de Buttler (2003), Miranda (2005) e Neno (2010). As etapas detalhadas da mistura são apresentadas no fluxograma da Figura 3. 6.

Figura 3. 6 - Fluxograma do processo de produção das argamassas



As argamassas foram caracterizadas no estado fresco e endurecido. Para a avaliação dos revestimentos foi aplicada argamassa sobre blocos cerâmicos. Estes blocos foram preparados,

⁹ Devido à predominância desse equipamento em obra e para validar a possibilidade de ampliação da aplicação dos agregados reciclados sem custos incorporados ao processo.

visando à melhoria da aderência dos revestimentos, de duas formas: a primeira com solução de cal¹⁰ e a segunda com chapisco.

Para a primeira, misturou-se 14 g de cal em um litro de água, essa combinação foi deixada em repouso para decantação, por um intervalo de 4 horas. Após esse período, transferiu-se cuidadosamente a água contendo apenas os íons de cálcio em solução para um *spray*, que serviu com aspersor para a aplicação da solução de cal nos blocos, 24 horas antes da execução do revestimento.

Na situação em que se utilizou o chapisco foi preparada argamassa de cimento e areia natural (a mesma utilizada para a argamassa de revestimento de referência), na proporção 1:3 (cimento e areia, em volume), aplicada sobre os blocos cerâmicos com a utilização de colher de pedreiro, ficando em câmara climática por 72 horas até a aplicação do revestimento.

Em ambos os tratamentos, os substratos foram umedecidos minutos antes da execução do revestimento, por meio de *spray*, com quantidade padronizada de água potável.

Para garantir a espessura constante (adotada em 3 cm), foram confeccionados dois tipos de gabaritos, colocados sobre os blocos no momento da aplicação: um gabarito utilizado para as argamassas produzidas com agregado passante na peneira 1,18 mm, que foi retirado imediatamente após o sarrafeamento e o outro para argamassas com agregado passante na peneira 3,00 mm, que permaneceu até a conclusão do estudo, evitando interferências devido à retirada do molde (Figura 3. 7).

¹⁰ A solução de cal é um tratamento alternativo da base que pode substituir o chapisco convencional com um custo bem reduzido. Esta escolha foi baseada nos trabalhos de Carasek; Scartezini (2001); Scartezini *et al.* (2002); Mota *et al.* (2009) e Silva *et al.* (2011) que encontraram resultados satisfatórios de aderência, algumas vezes superiores, quando da utilização da solução de cal em detrimento ao chapisco de cimento.

Figura 3. 7 - Moldes utilizados para os revestimentos: (a) removido e (b) mantido até o final dos ensaios.



A aplicação das argamassas ocorreu em bancada horizontal, diretamente sobre os blocos (mínimo de seis para cada situação estudada), não sendo confeccionadas paredes devido à possibilidade de manutenção dos corpos de prova, enquanto blocos individuais, em ambiente laboratorial controlado.

A aplicação foi realizada de forma manual, com o uso de colher de pedreiro e, após alguns minutos, houve o sarrafeamento (com uso de régua de alumínio) e o desempeno, com desempenadeira metálica. Após esse processo, a cada 5 minutos, em um intervalo de 30 minutos os revestimentos foram aspergidos com água, com uso de *spray* manual. Em seguida os blocos revestidos foram levados à câmara climática, com temperatura (23 ± 2 °C) e umidade ($75 \pm 10\%$) constantes.

A quantidade de material em cada traço foi, predominantemente, a suficiente para a produção de todos os corpos de prova sem a necessidade de uma nova mistura, evitando variabilidade dos resultados devido a qualquer tipo de alteração entre os processos de produção.

O procedimento de produção dos revestimentos é ilustrado na Figura 3. 8.

Figura 3. 8 - Processo de produção dos revestimentos (a) Separação e pesagem do material; (b) preparo e aplicação da argamassa e (c) revestimento no estado fresco e endurecido armazenado em câmara climática.



3.2.3 Caracterização no estado fresco

As argamassas produzidas foram avaliadas no estado fresco quanto as seguintes propriedades: densidade, teor de ar e consistência. A adição de água (relação água/materiais secos e relação água/cimento) foi controlada em função da trabalhabilidade, não havendo, entretanto, restrição de valores.

3.2.3.1 Densidade de Massa e Teor de ar

A densidade e o teor de ar foram determinados de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005), consistindo em aferir a massa de um recipiente cilíndrico vazio (cujo volume é medido enchendo-o com água quantificada em instrumento calibrado), preenche-lo com argamassa e aferir a massa final. Para o preenchimento do recipiente com argamassa foi utilizado o seguinte procedimento:

- Introduzir suavemente, com colher, porções de argamassa no recipiente calibrado, formando três camadas de alturas aproximadamente iguais. Em cada camada, aplicar 20 golpes ao longo do perímetro da argamassa. Cada golpe corresponde à entrada e à saída da espátula na posição vertical. Na primeira camada, a espátula não deve bater fortemente contra o fundo do recipiente, e nas demais camadas, a espátula deve ser aplicada somente com a força necessária para penetrar na superfície da camada imediatamente inferior.
- Após a execução e golpeamento da última camada, aplicar cinco golpes com o soquete, a intervalos regularmente distribuídos ao redor da parede externa do recipiente. Após a retirada da espátula, não devem ficar vazios entre a argamassa e a parede do recipiente.
- Rasar o recipiente a régua, em duas passadas ortogonais entre si, fazendo movimentos de vai-e-vem em toda a superfície, com inclinação de 45 em relação à superfície da argamassa. Se alguns grãos de areia existentes acima da borda do recipiente provocarem a subida da régua, o rasamento deve ser repetido após a eliminação dos grãos.

A operação foi realizada em no máximo 90 s, contados a partir do enchimento do recipiente (NBR 13278 (ABNT, 2005)) e é demonstrada na Figura 3. 9.

Figura 3. 9 - Determinação da densidade no estado fresco



A densidade é a razão entre a diferença entre as massas do conjunto preenchido de argamassa e do recipiente vazio e o volume do recipiente. Para cada traço foram feitas três medições e o valor da densidade em massa considerado foi a média dos valores obtidos.

O teor de ar incorporado (AI) foi determinado pela razão entre a densidade de massa aferida no ensaio (A) e a densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios (B), de acordo com a equação 3.2.

$$AI = 100 \left(1 - \frac{A}{B} \right) \quad (3.4)$$

3.2.3.2 Determinação do Índice de Consistência

O índice de consistência foi determinado por meio do teste em mesa, *Flow table*, realizado de acordo com as determinações da NBR 13276 (ABNT, 2002). O preparo das argamassas ocorreu 15 ± 2 minutos antes da realização do ensaio, ficando a argamassa em repouso durante esse período, sendo em seguida homogeneizada manualmente com espátula por no máximo 30 segundos.

Antes da realização do ensaio os equipamentos foram limpos, evitando impurezas que podem interferir no resultado final do ensaio, que é realizado preenchendo-se um molde tronco-cônico, colocado de modo centralizado sobre uma mesa para índice de consistência.

O molde foi preenchido em três camadas sucessivas, com alturas aproximadamente iguais, e foram aplicados em cada uma delas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete, de maneira a distribuí-las uniformemente. O rasamento da argamassa foi realizado passando a régua metálica rente à borda do molde tronco-cônico, com movimentos curtos de vai-e-vem ao longo de toda a superfície. Logo após, a mesa para o índice de consistência acionada, manualmente, de modo que foram efetuados 30 golpes em 30 segundos. Imediatamente após o último golpe da mesa, realizou-se a medida em três diâmetros tomados em pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo do perímetro, com o uso de régua metálica.

A Figura 3. 10 ilustra as etapas de desenvolvimento do ensaio de espalhamento, (a) moldagem do corpo tronco cônico, retirada do molde (b) e espalhamento após os 30 golpes para aferição das medidas para finalização do ensaio (c).

Figura 3. 10 - Ensaio da mesa de consistência (a) moldagem; (b) início e (c) finalização do ensaio.



O índice de consistência da argamassa corresponde à média das três medidas de diâmetro, expressa em milímetros e arredondada ao número inteiro mais próximo. As pesquisas internacionais variam a fixação e resistência, Corinaldesi (2009) 120 ± 10 mm, Jiménez *et al.* (2013) utilizou 175 ± 5 mm, Martínez *et al.* (2013) 190 ± 5 mm, para os trabalhos nacionais, Miranda (2005), sugere que a consistência seja mantida entre 280 e 330 mm, ou seja, as argamassas seriam mais fluidas que as produzidas internacionalmente.

3.2.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido

3.2.4.1 Absorção por imersão

Para a absorção por imersão, foram moldados três corpos de prova para cada situação, em molde cilíndrico, desmoldados após 48 horas e levados à câmara climática, juntamente com os blocos revestidos, onde permaneceram até serem submetidos ao ensaio de absorção total.

Aos 28 ± 1 dias os corpos de prova foram levados à estufa, retirados após 24 horas e, ao atingirem temperatura ambiente, tiveram sua massa aferida e ficaram submersos em água por mais 24 horas para medição da absorção total de água, que é determinada pela razão entre as massas dos corpos de prova antes do início do ensaio e após a retirada da imersão. O procedimento é apresentado na Figura 3. 11.

Figura 3. 11 - Procedimento de realização da absorção total



3.2.4.2 Retração

Para a avaliação da retração foram realizados ensaios baseados na NBR 15261 (2005), moldando-se três corpos de prova com dimensões de 25x25x300 mm, desmoldados em 24 h, para o início das medições, que foram realizadas com intervalo máximo de dois dias, durante 28 dias, verificando-se a variação dimensional das peças, por meio de aparelho comparador analógico da *Mitutoyo* com precisão de 1 μ m, disponível no LABITECC - EEC - UFG. Na Figura 3. 12 pode ser observada a montagem e realização do ensaio de retração das argamassas.

Figura 3. 12 - Ensaio de retração: (a) moldagem dos corpos de prova; (b) corpos de prova desenformados e (c) corpo de prova posicionado no aparelho comparador.



3.2.4.3 Resistência Mecânica

Os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão foram realizados de acordo com orientações prescritas da NBR 13279 (ABNT, 2005).

Foram moldados três corpos de prova prismáticos, 40 x 40 x 160 mm, para cada tipo de argamassa, os mesmos foram desmoldados após 72 horas e mantidos em temperatura e umidades controladas, temperatura de (23 ± 2) °C e umidade relativa do ar de $(70 \pm 10)\%$. A ruptura ocorreu na idade de 28 ± 1 dias.

Para a resistência à tração na flexão foi aplicada carga constante de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo de prova e a resistência calculada de acordo com a equação 3.5.

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad (3.5)$$

Em que:

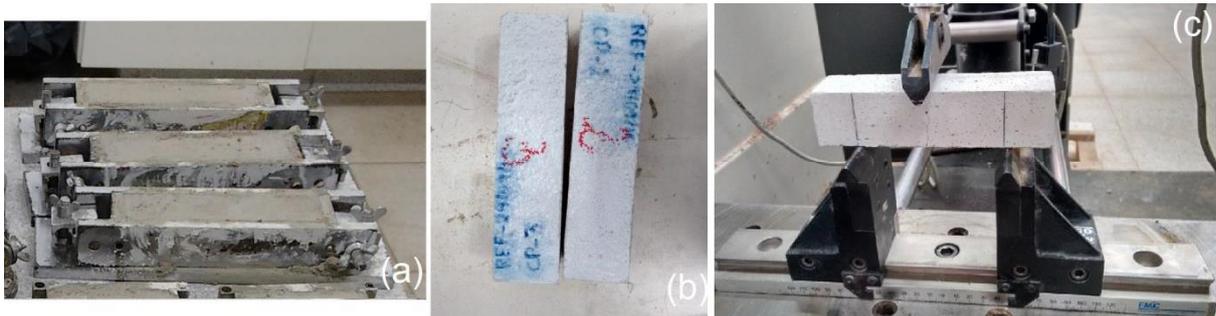
R_f = resistência à tração na flexão (MPa);

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = distância entre os suportes (mm).

A Figura 3. 13 ilustra o ensaio de resistência à tração na flexão das argamassas produzidas.

Figura 3. 13 - Ensaio de resistência à tração na flexão (a) moldagem; (b) corpos de prova e (c) momento do rompimento.



Para a resistência à compressão foram usadas as metades dos três corpos de prova provenientes do rompimento à tração na flexão, aplicando-se carga de (500 ± 50) N/s, até a ruptura do corpo de prova, a resistência à compressão é calculada de acordo com a equação 3.6.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.6)$$

Em que:

R_c = Resistência à compressão (MPa);

F_c = carga máxima aplicada (N).

Na Figura 3. 14 é apresentada as metades dos corpos de prova da resistência à tração na flexão que serão rompidos à compressão (a) e o momento do rompimento na prensa (b).

Figura 3. 14 - Ensaio de resistência à compressão (a) metades dos corpos de prova e (b) momento do rompimento na prensa.



3.2.5 Caracterização dos Revestimentos

Para avaliação de desempenho dos revestimentos foram realizadas avaliações visuais para a constatação de fissuras, entretanto, nenhum dos corpos de prova moldados para esta pesquisa apresentou fissuração. Em estudo preliminar, havia se constatado que a presença de cal e RCD nos traços de argamassa gerava elevado grau de fissuração, que se iniciava imediatamente após o final da aplicação dos revestimentos.

As demais propriedades avaliadas foram absorção pelo método do cachimbo e a resistência de aderência à tração, cuja metodologia é descrita nos subitens seguintes.

3.2.5.1 Absorção de água pelo método do cachimbo

O ensaio de absorção e permeabilidade à água pelo Método do Cachimbo determina a absorção de água e a permeabilidade dos revestimentos. Alguns autores nacionais desenvolveram trabalhos utilizando este método, entre eles Selmo (1989) e Almeida Dias e Carasek (2003), o qual será seguido neste trabalho.

O cachimbo é um tubo de vidro em forma de “L”, graduado em décimos de milímetro. Possui uma borda plana e circular no fundo, a qual é fixada à superfície do revestimento, com massa para calafetar e preenchido com água até o nível de referência (conforme Figura 3. 15).

Figura 3. 15 - Cachimbo para ensaio de absorção.



A água presente no tubo exercerá uma pressão inicial sobre a pequena área do revestimento. A diminuição na altura da água ao longo do tempo é usada como indicação da vulnerabilidade do material à penetração da água. Vale ressaltar que o caminho percorrido pela água do interior do cachimbo não é uniforme, podendo se espalhar de várias maneiras no revestimento, ou seja, não há uma seção constante de absorção, abrangendo permeabilidade, através da pressão exercida pela coluna d'água e absorção, quando há contato da água com a superfície do revestimento.

3.2.5.2 Resistência de aderência à tração

A resistência de aderência à tração foi avaliada por meio do ensaio de arrancamento (*pull-off test*), realizado de acordo com os procedimentos estipulados pela NBR 13528 (ABNT, 2010), que determina a extração de doze amostras de revestimento, escolhidas aleatoriamente. O ensaio foi executado de acordo com as especificações a seguir.

- a) Os corpos de prova foram preparados em laboratório em revestimentos aplicados sobre blocos cerâmicos, dispostos sobre bancada, mantidos em câmara climática com umidade e temperatura constantes durante 28 ± 2 dias;
- b) Foram retirados pelo menos doze corpos de prova com seção circular, de 50 mm de diâmetro, para cada situação;

- c) O corte foi feito utilizando-se serra de copo, com profundidade superior ao revestimento e com borda diamantada, provida de eixo central que garante a estabilidade do copo durante o corte, de modo a evitar vibrações prejudiciais à integridade do revestimento.
- d) A superfície do corpo de prova sobre a qual será fixada, com utilização de cola epóxi, a pastilha (placa metálica não deformável com a carga de ensaio, de seção circular, com 50 mm de diâmetro, com um dispositivo no centro para acoplamento do equipamento de tração), foi limpa para a remoção de partículas descartáveis.
- e) Acoplou-se o equipamento de tração à pastilha e iniciou-se a aplicação do esforço de tração, perpendicularmente ao corpo de prova, até a ruptura do mesmo, anotando-se o valor da carga e a forma de ruptura, verificando a zona mais frágil do revestimento.
- f) A tensão de ruptura foi determinada então, dividindo-se a tensão de ruptura (MPa) pela área da seção do corpo de prova (mm^2). Os resultados dependem da forma de ruptura do corpo de prova, a tensão encontrada equivale à resistência à tração da seção de ruptura.

Os resultados obtidos foram comparados aos valores da NBR 13749 (ABNT, 2013), que estipula os valores mínimos para aprovação do revestimento (0,20 MPa para paredes internas e 0,30 MPa para paredes externas), e entre as argamassas utilizadas.

O procedimento experimental é apresentado na Figura 3. 16.

Figura 3. 16 - Realização do ensaio de resistência de aderência à tração



CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados no desenvolvimento desta pesquisa, desde a caracterização dos agregados utilizados, das argamassas produzidas até o desempenho dos revestimentos aplicados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Inicialmente foram separados os agregados reciclados quanto à composição (cimentício e/ou cerâmico). A partir dos percentuais obtidos (Tabela 4. 1), na análise geral de imagens, foi considerado “agregado misto” o agregado composto por parcelas aproximadamente iguais de material cerâmico e cimentício e o agregado composto predominantemente por resíduos de concreto e argamassas foi denominado cimentício.

Tabela 4. 1 - Percentual de Composição dos Agregados Reciclados

Peneira	Agregado Misto		Agregado Cimentício	
	P. Vermelha	P. Cinza	P. Vermelha	P. Cinza
2,36 mm	37,4%	62,6%	6,7%	93,3%
1,18 mm	18,7%	81,3%	6,1%	93,9%
600 um	61,8%	38,2%	4,7%	95,3%
425 um	44,7%	55,3%	10,1%	89,9%
300 um	38,8%	61,2%	5,9%	94,1%
Média¹¹	42,9%	57,1%	6,9%	93,1%

Para utilização, os agregados passaram por peneiramento manual, em peneiras com abertura de 3 mm e 1,18 mm e, após esse processo, havia cinco amostras de agregados, conforme especificado na Tabela 4. 2.

¹¹ Média ponderada em função do % retido acumulado de granulometria dos agregados.

Tabela 4. 2 - Nomenclatura adotada para os agregados utilizados

Denominação	Descrição
ANat1	Areia natural de quartzo proveniente de rio, passante na peneira com abertura 1,18 mm.
ANat3	Areia natural de quartzo proveniente de rio, passante na peneira com abertura 3,00 mm.
AMis1	Agregado reciclado proveniente da moagem de resíduo de construção misto composto de resíduo cimentício (argamassas e concretos) e cerâmica (blocos e telhas), passante na peneira com abertura 1,18 mm.
AMis3	Agregado reciclado proveniente da moagem de resíduo de construção misto composto de resíduo cimentício (argamassas e concretos) e cerâmica (blocos e telhas), passante na peneira com abertura 3,00 mm.
ACim3	Agregado reciclado proveniente da moagem de resíduo de construção composto de resíduo cimentício (predominantemente concreto) passante na peneira com abertura 3,00 mm.

Os agregados foram caracterizados de acordo com os procedimentos descritos na metodologia e os resultados obtidos são apresentados nos itens subsequentes. Na Tabela 4. 3 é apresentado um resumo dos resultados de caracterização obtidos, que serão detalhados nos subitens a seguir.

Tabela 4. 3 - Resultados da caracterização dos agregados

Agregado	DMC	MF	TMP	A	ME	MU	e	η	Eo	UC	CI	Ii
ANat1	1,18	2,20	1,62	0,85	2,70	1,43	0,89	0,47	0,53	6,30	1,40	1,00
ANat3	2,36	1,91	4,10	2,97	2,73	1,44	0,89	0,47	0,53	8,50	1,49	0,50
AMis1	1,18	1,62	6,58	6,11	2,68	1,21	1,22	0,55	0,45	21,00	1,53	7,00
AMis3	2,36	2,07	13,96	12,01	2,69	1,46	0,85	0,46	0,54	16,60	1,66	5,00
ACim3	2,36	2,09	17,60	16,58	2,54	1,28	0,99	0,50	0,50	19,20	1,50	7,00

DMC = Dimensão máxima característica (calculada de acordo com a NBR NM 248:2003), em mm;

MF = Módulo de finura (calculado de acordo com a NBR NM 248:2003), adimensional;

TMP = Teor de material pulverulento (determinado de acordo com a NBR NM 46:2003), em %.

A = Absorção de água do agregado (de acordo com a NBR NM 30 (ABNT, 2001)), em %;

ME = Massa específica real dos grãos, em g/cm³;

MU = Massa unitária, em g/cm³;

e = Índice de vazios não compactado = ME/MU - 1, adimensional;

η = Porosidade = $e/(1+e) \times 100$, em %;

Eo = Fator de empacotamento = $100 - n$, em %;

UC = Umidade crítica (determinada de acordo com a NBR 6467 (ABNT, 2006));

CI = Coeficiente de Inchamento (determinada de acordo com a NBR 6467 (ABNT, 2006));

Ii = Início do inchamento (teor de umidade em que o Coeficiente de Inchamento passou a ser superior a 1,05);

4.1.1 Granulometria

A distribuição granulométrica, morfologia das areias e o teor de ar incorporado são propriedades influentes no comportamento das argamassas no estado fresco. Freias e Costa (2010) afirmam que os teores da fração fina e graúda das areias e o empacotamento desses grãos influenciaram no comportamento reológico das argamassas por eles estudadas.

Fuller e Thowpson (1907¹², *apud* CARNEIRO, CINCOTTO, 1999) a partir de experimentos empíricos de dosagens, mostraram que, para uma mesma porcentagem de cimento num dado volume de concreto, havia certa distribuição de tamanhos de grão do agregado que dava a maior resistência mecânica e, no lançamento a melhor trabalhabilidade; concluindo que a distribuição granulométrica influencia na compacidade da mistura, pois observaram que quanto maior for a compacidade maior é a resistência mecânica das argamassas e concretos.

Destaca-se então, a importância da avaliação da distribuição e formato das partículas no desenvolvimento de estudos com novos materiais, cujo comportamento ainda é obscuro, com padrão ainda não totalmente definido pelos trabalhos dos diversos autores.

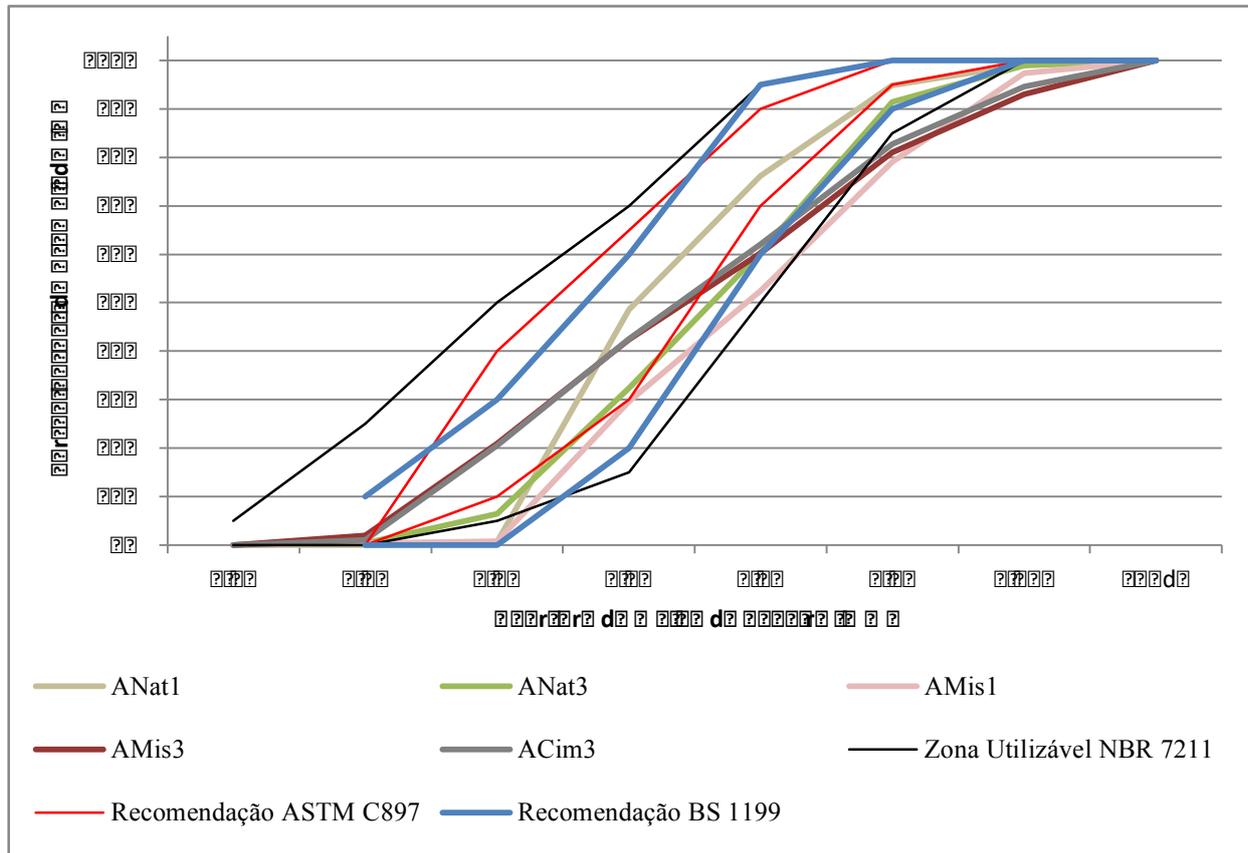
A distribuição granulométrica e o módulo de finura dos agregados reciclados, passantes na peneira 3 mm (AMis-3 e ACim-3), comprova a homogeneidade nos ciclos de produção dos mesmos e demonstra que, independente do material processado, para um mesmo equipamento de moagem, obtém-se um material com distribuição contínua e aumento gradual de aproximadamente 20% nos percentuais retidos acumulados em cada uma das peneiras da série normal.

A curva granulométrica média dos agregados é apresentada na Figura 4. 1 em que pode-se observar que os agregados estão inseridos, em sua maioria, na área delimitada pela zona utilizável, estabelecida na NBR 7211 (ABNT, 2009), que foi empregada a título de referência, uma vez que não existem parâmetros para agregados miúdos de argamassas na normalização brasileira. Apenas as parcelas inferiores a 150 µm os agregados reciclados possuem percentual retido acumulado inferior ao preconizado pela NBR 7211 (ABNT, 2009), devido principalmente ao grande teor de material pulverulento presente nas amostras.

¹² Füller, Willian B. e Thowpson, Sanford E. **The Laws of Proportioning Concrete**. Proceedings of American Society os Civil Engineers. N3. Vol. XXXIII, March, 1907, p. 223-298.

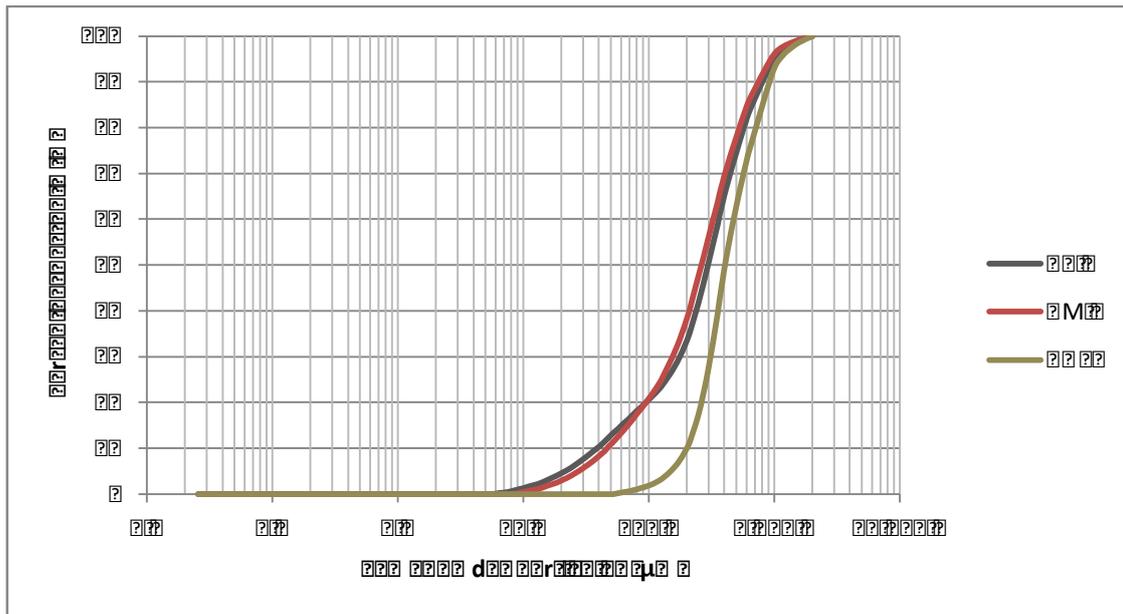
Quanto às normas internacionais, BS 1199 (2014) e ASTM C 897 (1983), apenas o agregado natural ANat1 atende ambos os critérios; a areia natural ANat3 atende ao estabelecido na BS 1199 (2014). As areias recicladas ficam fora da faixa recomendada de distribuição granulométrica segundo essas duas normas.

Figura 4. 1 - Curvas granulométricas dos agregados



Na análise de granulometria a laser, sem a utilização de ultrassom, os percentuais retidos acumulados demonstram que os finos presentes na areia natural são maiores que os presentes nos agregados reciclados (Figura 4. 2).

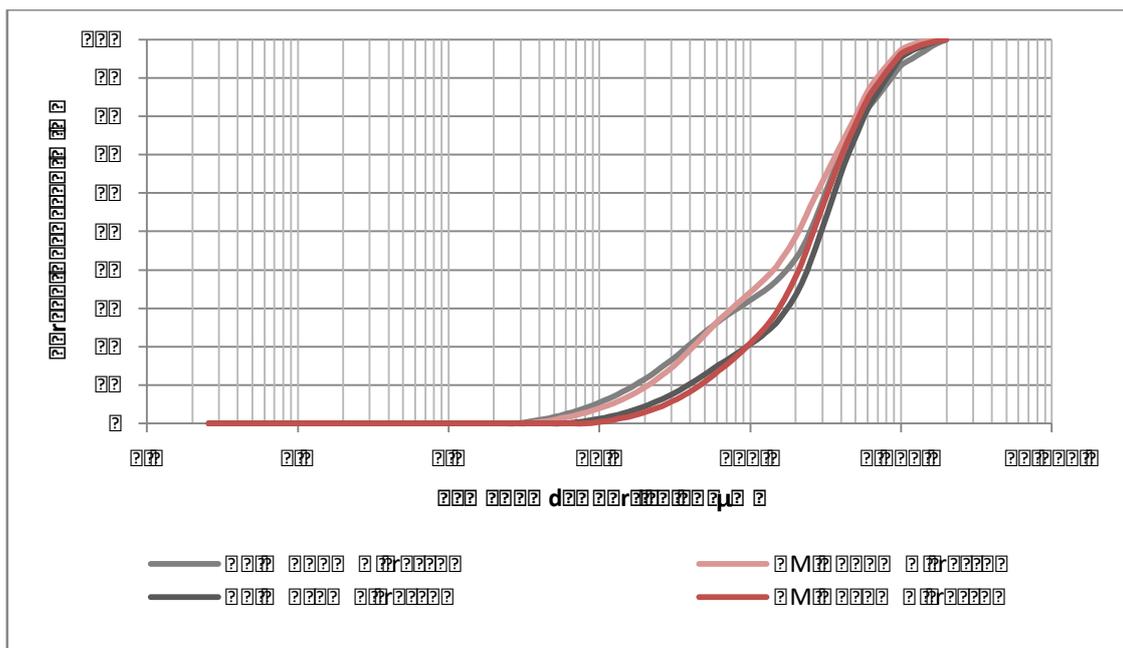
Figura 4. 2 - Granulometria a laser sem ultrassom



Ainda na avaliação sem ultrassom, os grãos de areia natural possuem dimensão mínima de 62,22 μm (percentual passante de 0,35%), enquanto que o agregado reciclado AMis tem partículas que chegam a 9,25 μm (percentual passante de 0,23%), sendo ainda inferior para o ACim 6,54 μm (0,22%).

Foi realizado ensaio com ultrassom apenas para os agregados reciclados, cujo comparativo das curvas obtidas é apresentado na Figura 4. 3.

Figura 4. 3 - Comparativo de granulometria a laser: com e sem a utilização de ultrassom



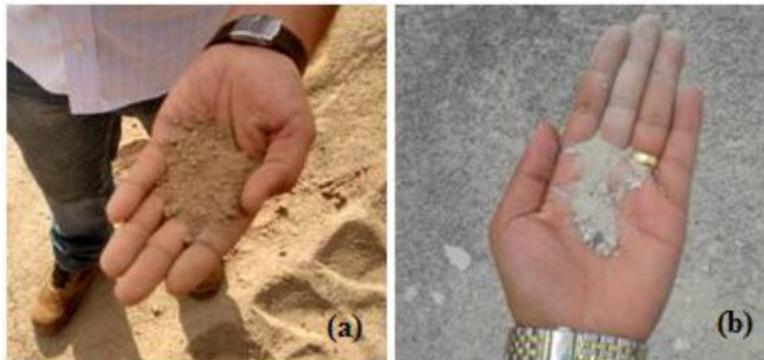
Avaliando-se os resultados com e sem a utilização de ultrassom (Figura 4. 3), as dimensões mínimas obtidas foram reduzidas, e passaram a ser de 3,27 e 3,89 para os agregados AMis e ACim, respectivamente. Para esses dois agregados permanece a similaridade das curvas obtidas.

O ensaio com o ultrassom demonstrou a existência de frações finas que ficam aglomeradas, provavelmente devido à atração eletrostática que ocorre com o processo de britagem ou pela reaglutinação das partículas que contém material cimentício. É possível que a umidade do ar e a presença de material cimentício alcalino, crie um ambiente favorável ao desenvolvimento de reações pozolânicas nos grãos, o que poderá ser estudado em avaliação profunda do material, para permitir conclusões definitivas sobre o comportamento dos agregados oriundos de RCD.

4.1.2 Teor de material pulverulento

Há em todos os trabalhos relacionados aos agregados reciclados, destaque na grande quantidade de material pulverulento, que é visível ao se ter contato com o material (Figura 4. 4). Para a determinação do teor de material pulverulento, foram realizados, para todos os agregados utilizados, os procedimentos preconizados pela NM 46 (ABNT, 2003).

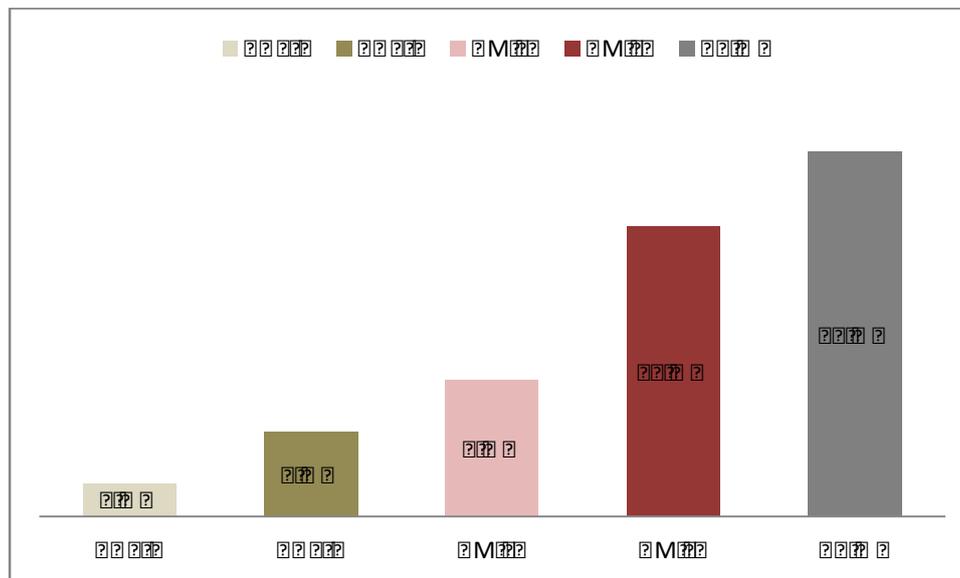
Figura 4. 4 - Finos (a) Agregado Reciclado Misto e (b) Agregado Reciclado Cimentício



Diversos autores sugerem a lavagem e retirada, ou redução, dessa parcela de material pulverulento dos agregados de RCD (MIRANDA, 2000; ULSEN, 2009). De forma a evitar a utilização de água, enquanto recurso natural, e buscando um método mais ecologicamente correto e facilmente aplicável em obra, optou-se pela passagem do resíduo em peneiras com abertura de 3 mm e 1,18 mm, verificando-se que grande parte do pó era retirado com ação natural da agitação durante o peneiramento.

Constatou-se, na avaliação do teor de material pulverulento, que a parcela inferior a 75 μm foi reduzida em mais de 50%, para o mesmo tipo de areia, quando se diminuía a abertura em malha da peneira (comparativo entre ANat1 e ANat3 e entre AMis1 e AMis3), os valores podem ser vistos na Figura 4. 5.

Figura 4. 5 - Teor de material pulverulento dos agregados



Conforme esperado, houve um elevado teor de finos nas areias provenientes da moagem do RCD, superior ao existente na areia natural de quartzo e acima do preconizado pela NBR 7211 (ABNT, 2009), de até 12% para concretos protegidos do desgaste superficial e para os quais seja comprovada que o material pulverulento seja oriundo exclusivamente da britagem das rochas e desde que os grãos não interfiram nas propriedades dos concretos.

Entretanto, comparando-se os agregados reciclados de mesma granulometria, AMis3 e ACim3, verifica-se que o segundo possui um maior teor de finos, em desacordo com esperado devido às duas origens de RCD. Ressalta-se que, além disso, o ACim3 possui os menores tamanhos de grãos em sua composição, conforme verificado pela análise de granulometria a laser.

4.1.3 Absorção de água

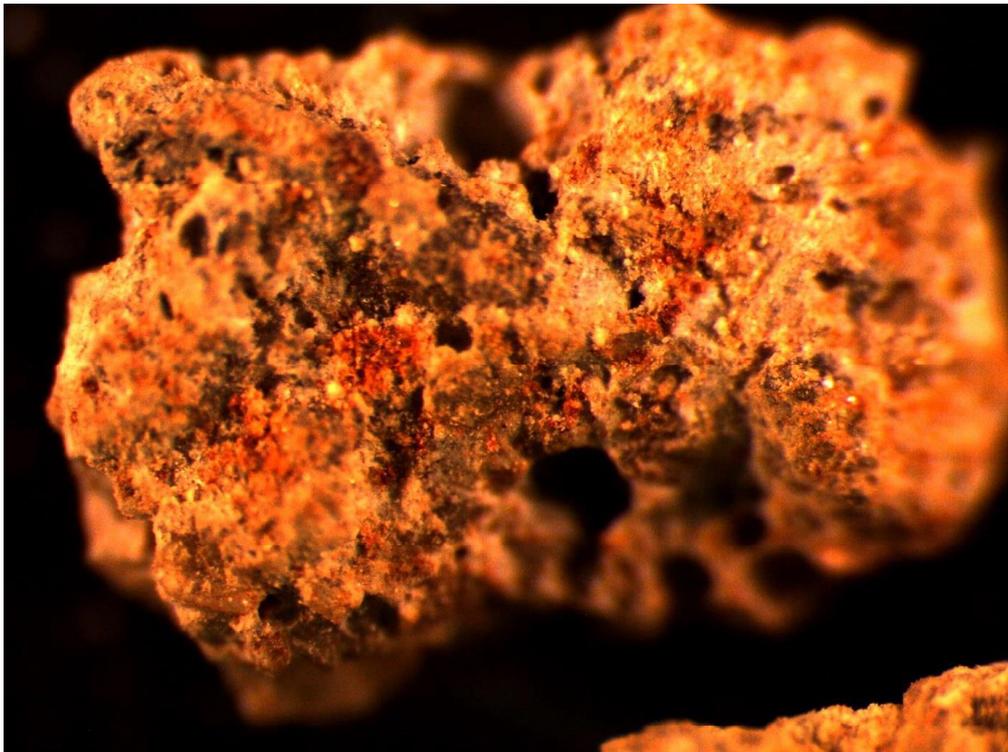
A absorção de água (Tabela 4. 3 apresentada anteriormente) foi muito superior para os agregados reciclados, passando de 3% na ANat3 para 16,6% na ACim3, o que era esperado e está em consonância com o obtido pelos diversos autores.

Entretanto, em divergência ao encontrado por Corinaldesi e Moriconi (2009) e Miranda (2005), o resíduo com maior concentração de material cerâmico apresentou absorção de água inferior ao agregado composto de material cimentício. Tal característica é importante e revela a necessidade de conhecer a procedência do material que originou o RCD.

O resíduo cimentício utilizado nesta pesquisa é proveniente de sobras de caminhões betoneira e restos de concreto de obra, ou seja, um material com elevada relação água/cimento (acrescentada na lavagem dos caminhões), que não foi vibrado ou compactado, apenas descartado e, por esta razão, possuía grande porosidade na pasta de cimento.

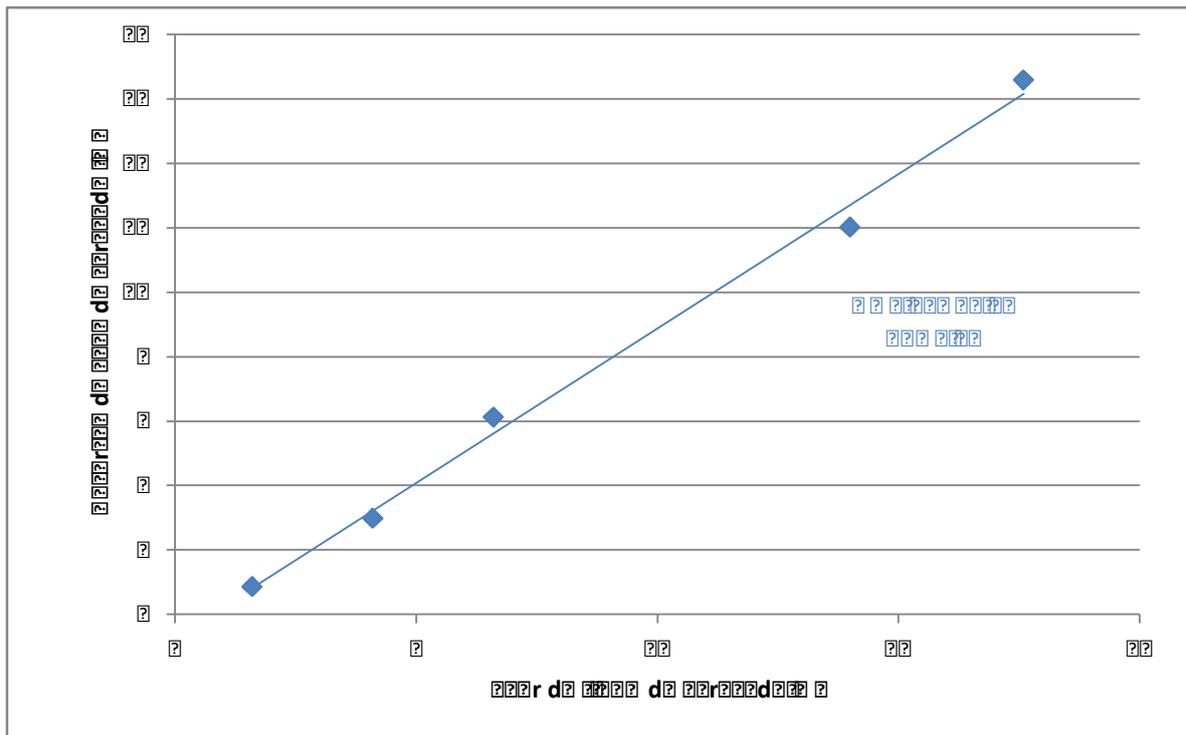
A Figura 4. 6 ilustra a porosidade do agregado cimentício, provavelmente ocasionada pelo excesso de água adicionada que evaporou e deixou os vazios no material.

Figura 4. 6 - Porosidade de grão do agregado reciclado cimentício



A absorção de água dos grãos demonstrou ser diretamente proporcional ao teor de material pulverulento dos agregados estudados, conforme pode ser observado na Figura 4. 7.

Figura 4. 7 – Absorção de água dos agregados em função do teor de finos dos agregados



Miranda (2005) já havia concluído que o teor de finos (fração < 75 μm) e absorção de água dos agregados são as propriedades que mais apresentam variação, dentro inclusive de um mesmo lote de materiais, influenciando significativamente nas propriedades das argamassas e no desempenho dos revestimentos quanto à fissuração, sendo assim propriedades críticas de controle.

4.1.4 Interação entre as partículas

Apesar da equivalência das massas específicas, há uma grande variação das massas unitárias dos agregados reciclados (Tabela 4. 4), significando que o volume de vazios varia de acordo com o tipo de resíduo utilizado, sendo que, quanto menor a massa unitária maior será o volume de vazios do material, que pode ser originado tanto da porosidade do material quanto da heterogeneidade do tamanho das partículas e das dimensões das partículas.

Tabela 4. 4 - Resultados de interação entre as partículas

Agregado	ME (g/cm³)	MU (g/cm³)	Índice de vazios (e)	Porosidade (η)	Fator de empacotamento (E₀)
ANat1	2,70	1,43	0,89	0,47	0,53
ANat3	2,73	1,44	0,89	0,47	0,53
AMis1	2,68	1,21	1,22	0,55	0,45
AMis3	2,69	1,46	0,85	0,46	0,54
ACim3	2,54	1,28	0,99	0,50	0,50
Média	2,67	1,36	0,97	0,49	0,51
Desvio Padrão	0,07	0,11	0,15	0,04	0,04
C. V. (%)	2,8%	8,2%	15,5%	7,5%	7,2%

Para avaliar o comportamento entre as partículas, no estado solto, calculou-se o índice de vazios (e), a porosidade (η) e o fator de empacotamento (E₀) de cada amostra pela relação entre a massa específica e a massa unitária dos agregados, determinadas de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2003) e NBR 7251 (ABNT, 1982). Os resultados demonstram que as características dos agregados apresentaram pequenas variações quando comparados entre si, destacando-se a semelhança entre AMis3 e ANat3.

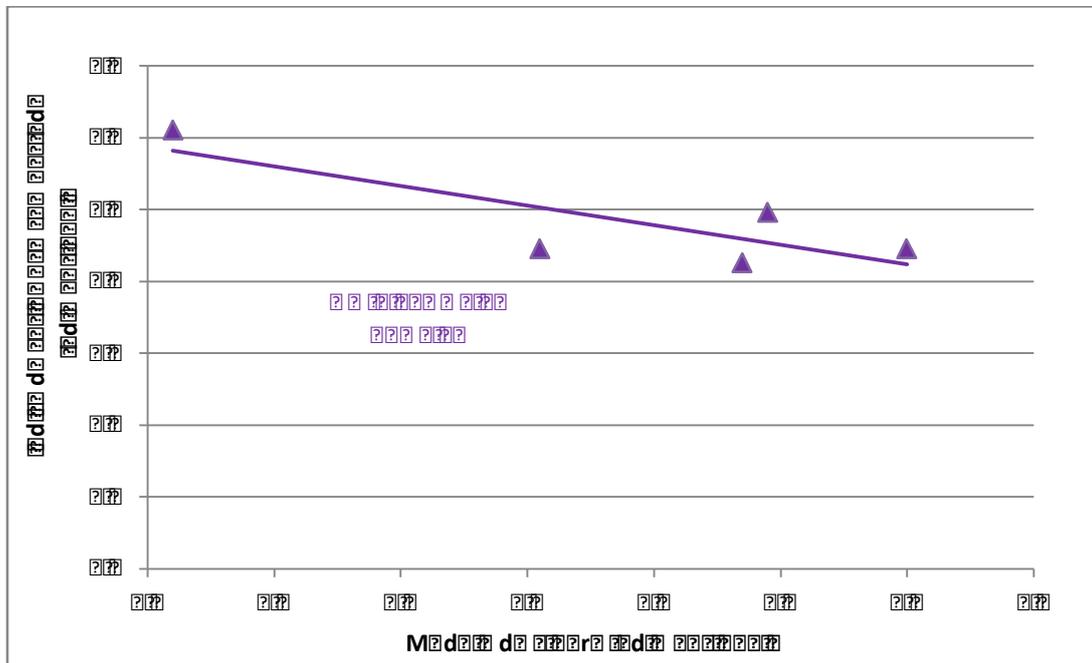
Assim como nos resultados obtidos, Levy e Helene (1997), Miranda (2005) e Martinez *et al.* (2013) variaram o tipo de RCD utilizado entre cerâmico e cimentício e, nos três trabalhos, e a variação da massa específica entre os agregados reciclados não foi significativa do ponto de vista estatístico (coeficiente de variação de 0,28% ; 1,42% e 0,95%, respectivamente).

Em contrapartida, Corinaldesi e Moriconi (2009), obtiveram um aumento significativo (15,5%) da massa específica quando se alterava o agregado de resíduo cerâmico por agregado de concreto o que permite inferir que, os agregados provenientes de RCD não podem ser classificados apenas quanto ao tipo de material, devendo ser feita avaliação completa das suas características, que serão variáveis de acordo com a origem do resíduo. Provavelmente o resíduo estudado pelos autores tratava-se de concreto de demolição, consolidado e com redução de poros na pasta de cimento.

Carasek *et al.* (2016) avaliam que a massa unitária, fator de empacotamento, índice de vazios e porosidade sofrem influência do tamanho dos grãos de agregados naturais e provenientes de rochas britadas. Esta informação foi confirmada também na presente pesquisa com os agregados naturais e reciclados pela correlação entre o Módulo de Finura e o Índice de Vazios,

demonstrando que o tamanho máximo dos grãos e a distribuição granulométrica tem influência direta, tanto na porosidade da amostra quanto no fator de empacotamento (Figura 4. 8).

Figura 4. 8 - Relação entre módulo de finura e índice de vazios não compactado.

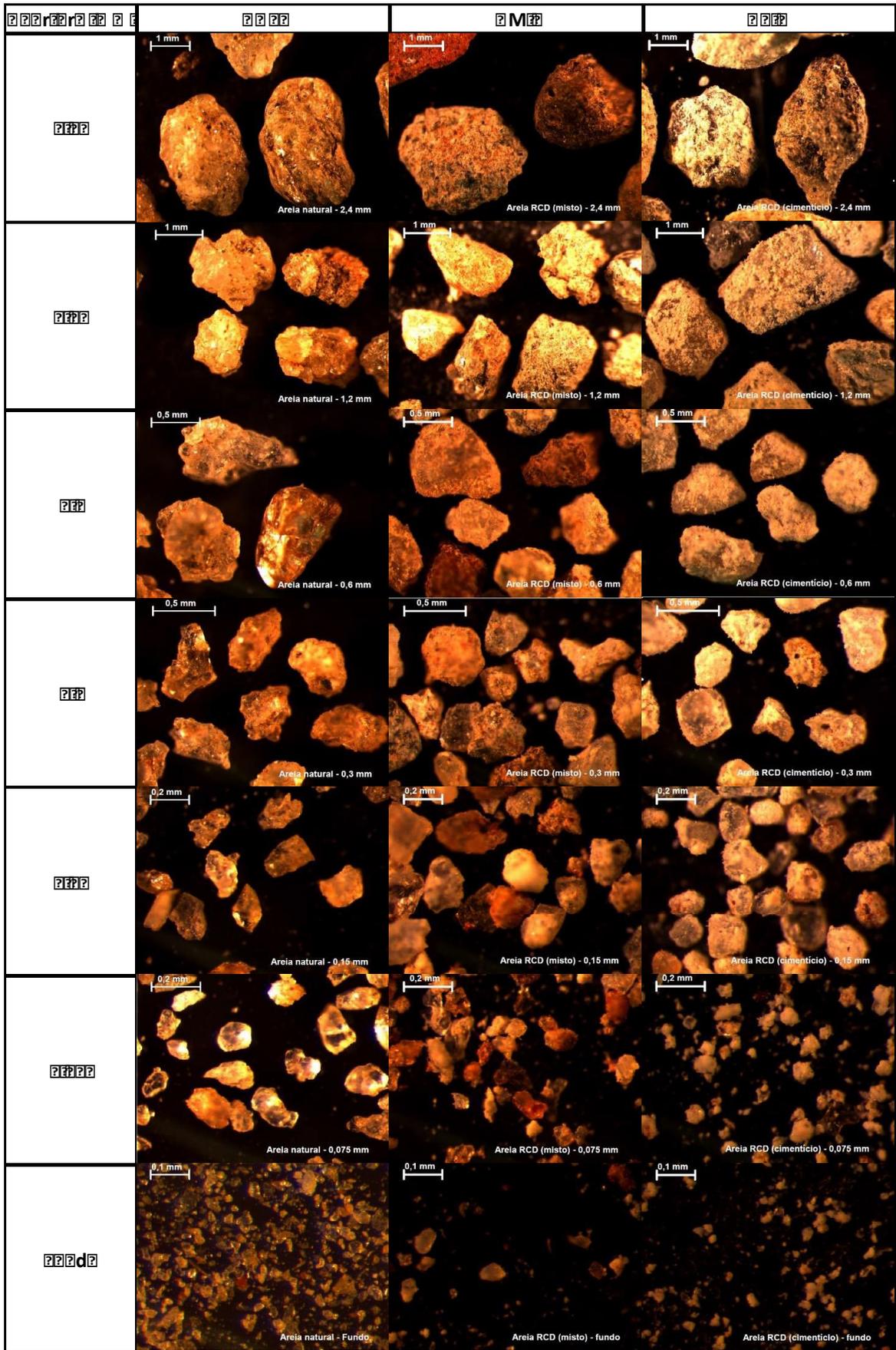


4.1.5 Análise morfoscópica

Foram obtidas imagens, por meio de lupa estereoscópica, para determinar o índice de forma (IF), a esfericidade (f) e o f -circle¹³ das amostras de agregados. A título de exemplificação, uma fotografia de cada fração granulométrica é apresentada na Figura 4. 9.

¹³ O valor obtido para f -circle é a relação entre a área e o perímetro do agregado, utilizando-se a fórmula $((4\pi \cdot \text{área}) / \text{perímetro}^2)$, de forma que, quanto mais próximo de 1, mais a forma do agregado se aproxima de um círculo perfeito.

Figura 4. 9 - Imagens dos agregados obtidas por meio de lupa estereoscópica



A média ponderada¹⁴ (em função das faixas granulométricas) obtida por meio da análise morfológica das fotografias é apresentada na Tabela 4. 5.

Tabela 4. 5 - Resultados da análise por imagem dos agregados

Agregado	IF	Esfericidade	f-circle	Parâmetros ¹⁵
ANat1	0,62	0,78	0,80	$0 \leq f\text{-valor} < 0,25$: muito alongado; $0,25 \leq f\text{-valor} < 0,50$: alongado; $0,50 \leq f\text{-valor} < 0,75$: cúbico; $0,75 \leq f\text{-valor} = 1$: circular.
ANat3	0,62	0,79	0,81	
AMis1	0,64	0,79	0,82	
AMis3	0,64	0,79	0,81	
ACim3	0,65	0,81	0,82	

Quanto ao índice de forma, os agregados foram considerados cúbicos e quanto à esfericidade e *f-circle*, circulares. Não houve diferenças significativas entre os agregados estudados, indicando a eficiência na produção dos agregados reciclados, que obtiveram equivalência ao agregado natural, quanto ao formato das partículas.

4.1.6 Coeficiente de Inchamento e Umidade Crítica

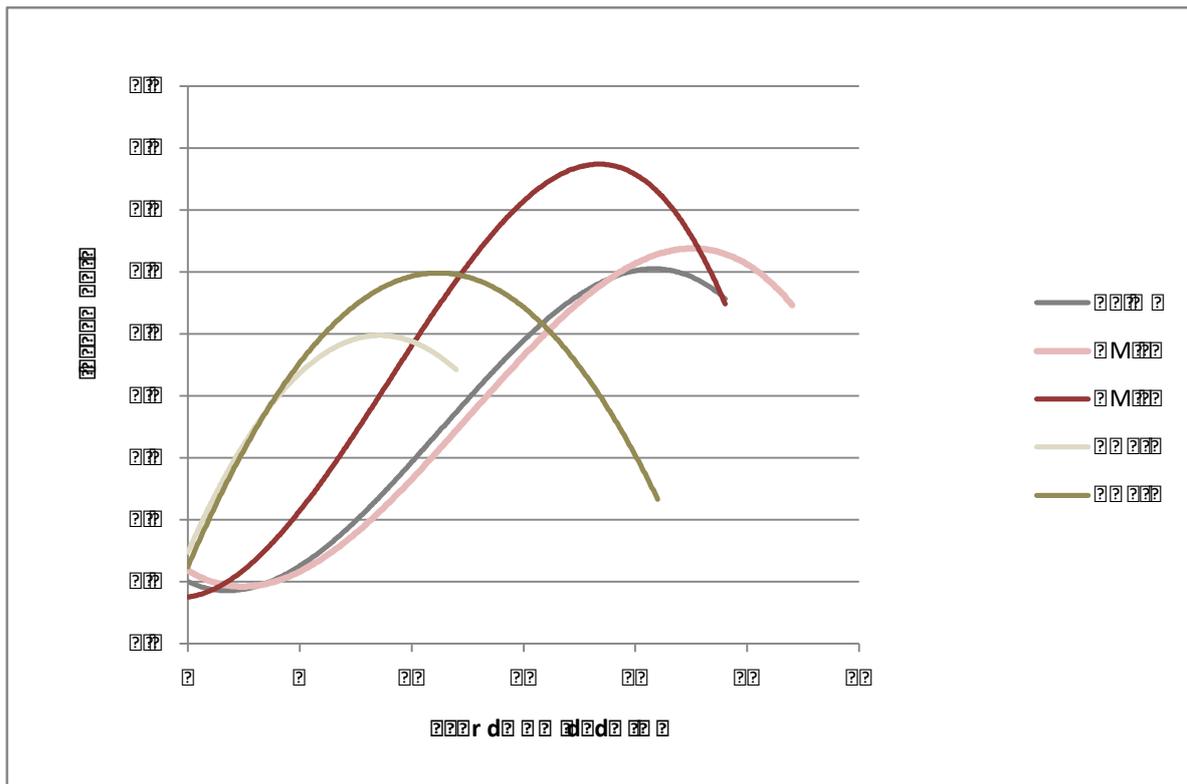
A absorção da água livre pelos grãos do agregado gera variação do volume e da massa, fenômeno definido como inchamento, segundo a NBR 6467 (ABNT,2006). Entretanto para Neville (1997) a água adsorvida é que gera deslocamento das partículas para separá-las de maneira que tal expansão é o inchamento. Independente de que se o fenômeno se deve à água apenas absorvida ou também pela adsorvida, o coeficiente de inchamento é o quociente do volume úmido pelo volume seco. A umidade crítica é o valor máximo de teor de umidade, a partir do qual o coeficiente de inchamento apresentará constância.

As curvas obtidas para os agregados estudados são apresentadas na Figura 4. 10.

¹⁴ Os valores tiveram coeficiente de variação inferiores a 5%, por isso considerou-se a amostra homogênea quanto a forma. O resultado completo pode ser observado no Apêndice A.

¹⁵ Definidos por Westerholm *et al.* (2008) e utilizados também por Araújo (2015), sendo um parâmetro de classificação para o índice de forma, a esfericidade e o *f-circle*.

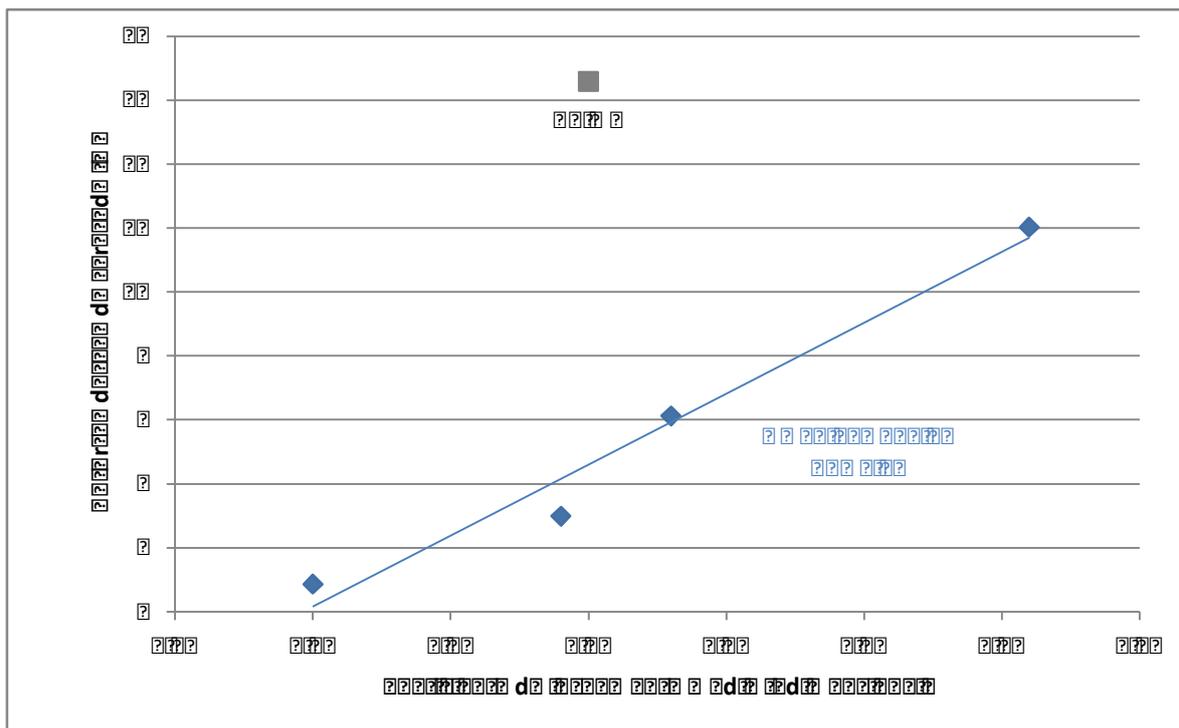
Figura 4. 10 – Ensaio de inchamento dos agregados



Na Figura 4. 10 pode-se notar que os agregados de RCD têm um comportamento diferente dos agregados naturais, mostrando um atraso no início do inchamento. Esse comportamento observado cria uma nova perspectiva com relação à avaliação dos agregados reciclados, uma vez que não há inchamento significativo até o teor de umidade atingir aproximadamente 5%. Esse resultado, que até o momento não foi discutido pelos autores que avaliaram o RCD, pode justificar a cura úmida interna suposta por Buttler (2003) e Jochem (2012), proporcionada pela absorção de água dos agregados, que permanece após o início de pega e nas primeiras idades da argamassa, o que também pode explicar a elevada retração das argamassas produzidas com RCD e o surgimento de fissuras com a saída da água absorvida devido à secagem do material.

O coeficiente de inchamento médio mostrou-se dependente da absorção de água do agregado (Figura 4. 11), em comportamento que indica haver relação direta entre as duas propriedades, entretanto, o agregado ACim3 mostrou-se espúrio à tendência geral.

Figura 4. 11 - Absorção de água do agregado em função do coeficiente de inchamento médio

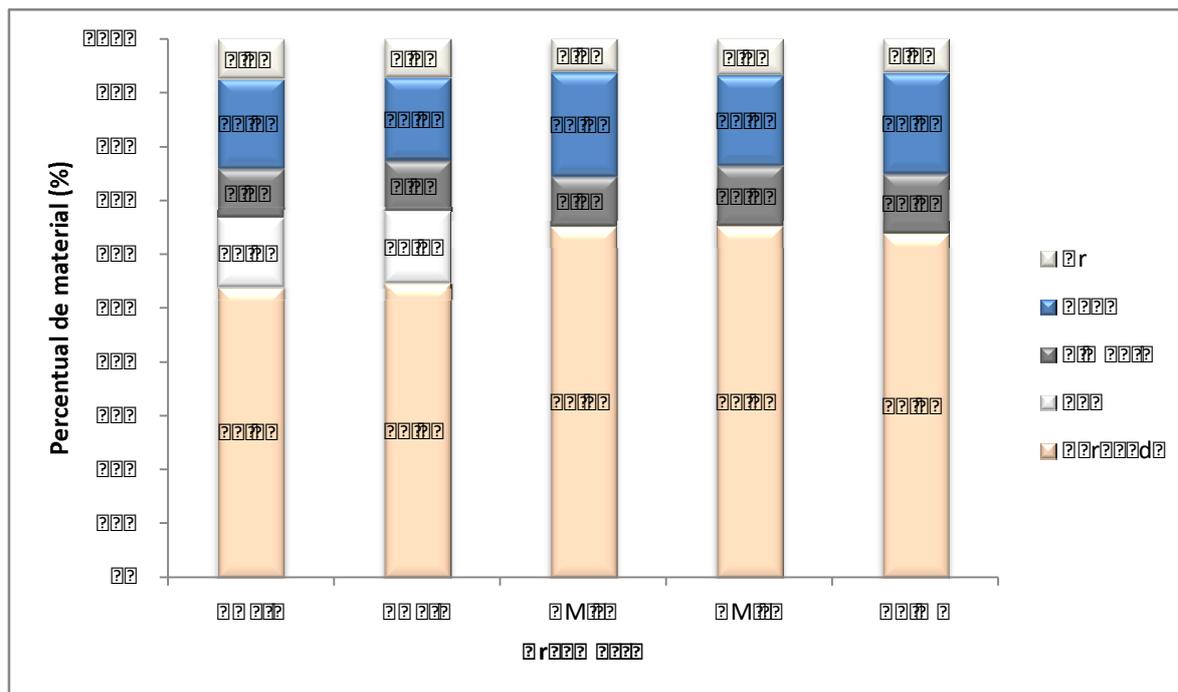


Essa correlação entre a absorção do agregado e o coeficiente de inchamento médio pode ser a justificativa para o comportamento diferenciado quanto à absorção de água e relação água/materiais secos de argamassas produzidas com areias de variadas origens.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Inicialmente foi calculado o teor de fases das argamassas (Figura 4. 12), com base nos trabalhos de Quarcioni *et al.* (2009) e Carvalho e Carasek (2013). Observa-se que houve semelhante incorporação de ar e parcelas finais constituintes das argamassas produzidas com RCD e com areia natural, à exceção de teor de agregados, que foi significativamente maior para os agregados reciclados, cujas argamassas não possuem a cal.

Figura 4. 12 - Volume ocupado pela fração dos constituintes das argamassas no estado plástico



As características avaliadas foram a relação água/cimento e água/materiais secos, e as argamassas produzidas foram ensaiadas quanto à densidade em massa e consistência, por meio do método da mesa da ABNT (*flow table*). Os resultados dessa etapa são apresentados na Tabela 4. 6.

Tabela 4. 6 - Características das argamassas no estado fresco

Tipo de agregado	Teor de finos das argamassas	Água/cimento	Água/materiais secos	Densidade (g/dm ³)	Consistência (mm)
ANat1	26,2%	1,73	21,6%	2,01	267
ANat3	28,2%	1,59	20,0%	1,97	229
AMis1	19,9%	1,79	25,5%	1,83	258
AMis3	29,4%	1,57	22,5%	1,95	258
ACim3	27,7%	1,59	24,8%	1,79	275

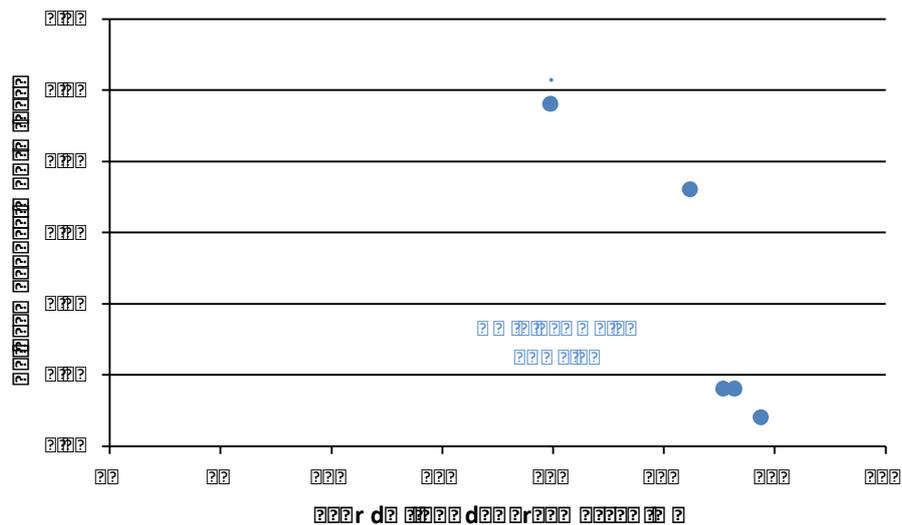
Quando se avalia separadamente os agregados que possuem duas faixas granulométricas (ANat e AMis) percebe-se que a densidade, tanto da argamassa quanto do agregado aumentam a medida que se aumenta a granulometria máxima do agregado. Isto ocorre devido a interação de dois fatores: a presença de partículas maiores, mais compactas e o aumento do teor de finos dessas argamassas, que passaram a preencher os interstícios entre os grãos de agregado.

Corroborando os resultados de Machado (2014) e Pedrozo (2008), independente do tipo de agregado utilizado há uma redução na densidade das argamassas, quando comparadas ao

agregado natural, provavelmente essa redução é devida a maior porosidade do agregado reciclado.

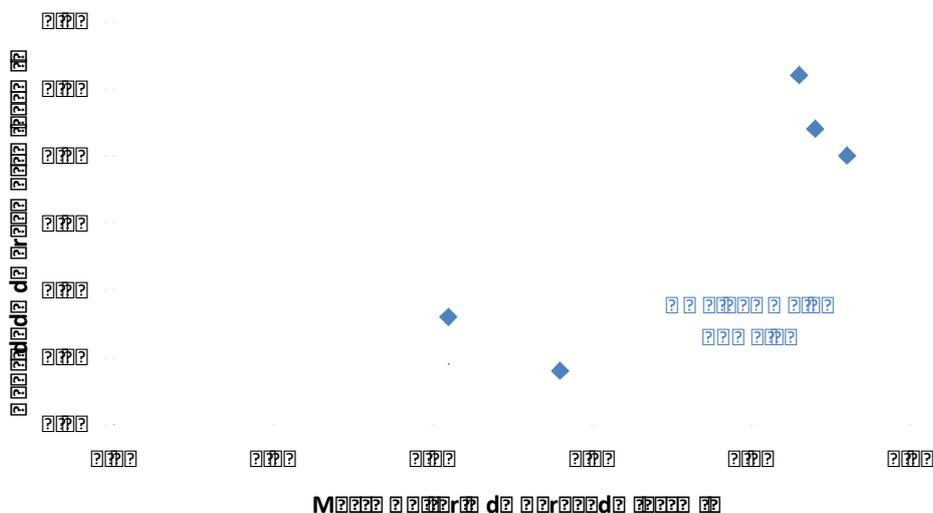
A relação água/cimento obtida para as argamassas é explicada pelo teor de finos das argamassas (Figura 4. 13), no entanto, este parâmetro não explica a relação água/materiais secos.

Figura 4. 13 - Relação água/cimento em função do teor de finos das argamassas



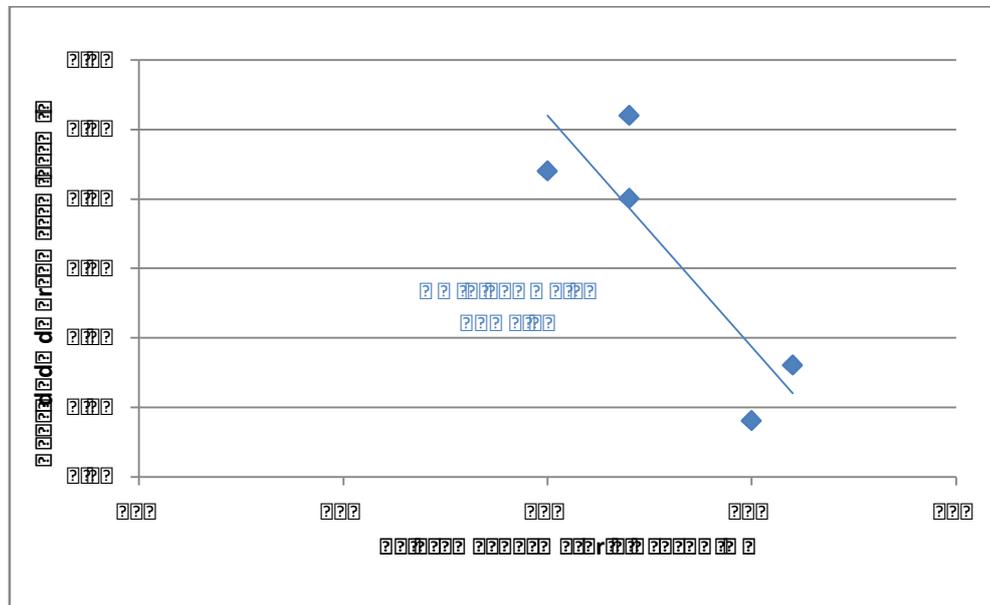
A densidade das argamassas apresentou correlação significativa com a massa unitária dos agregados utilizados. A partir da Figura 4. 14 é possível inferir que a densidade da argamassa é variável dependente direta da massa unitária do agregado no estado solto seco em estufa.

Figura 4. 14 - Correlação entre densidade do agregado e densidade da argamassa



Em contrapartida, a densidade em massa das argamassas é inversamente proporcional à relação água/materiais secos (Figura 4. 15).

Figura 4. 15 - Densidade da argamassa em função da relação água/materiais secos



É interessante salientar, que apesar da boa correlação encontrada entre densidade da argamassa no estado fresco e a relação água/materiais secos, o mesmo não acontece quando se busca a correlação entre a relação água/cimento e a densidade.

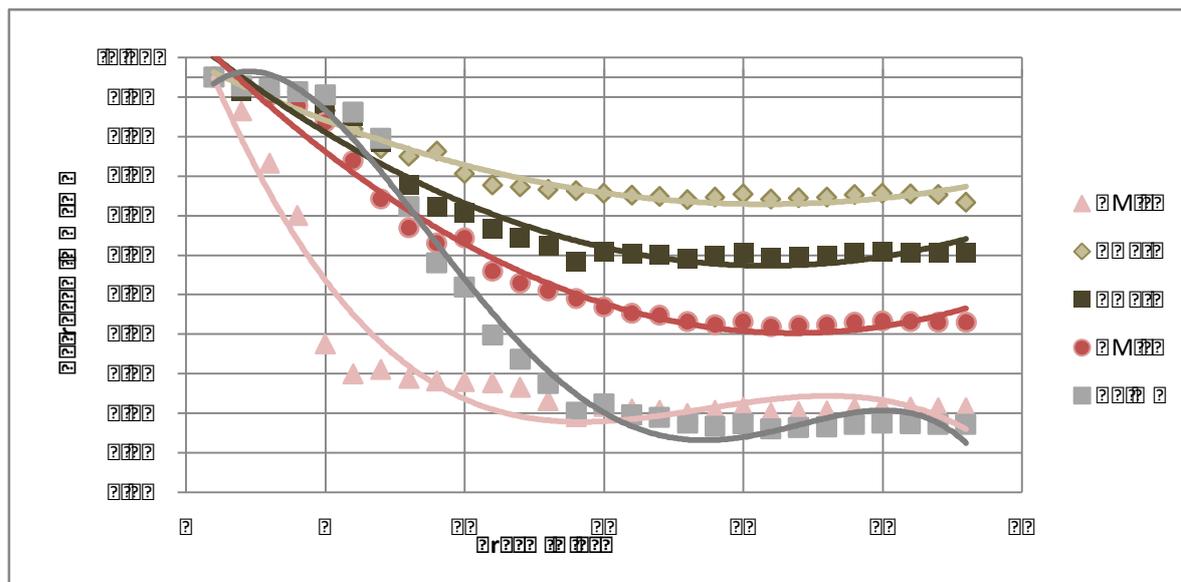
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, as argamassas foram ensaiadas aos 28 ± 2 dias, quanto à retração, absorção de água por imersão e resistência mecânica (tração na flexão e compressão). Os resultados obtidos são discutidos nos tópicos subsequentes.

4.3.1 Retração

A retração foi medida por um período de vinte e oito dias em, no mínimo, três corpos de prova para cada uma das argamassas estudadas, com intervalo máximo de dois dias entre uma medição e outra. Os valores médios obtidos de retração, em mm/m, a cada dia foram compilados no gráfico da Figura 4. 16 e a média dos resultados individuais pode ser conferida no Apêndice B.

Figura 4. 16 - Retração das argamassas ao longo do tempo



O comportamento de retração das argamassas foi semelhante, sendo dividido em quatro períodos bem característicos:

O primeiro intervalo de tempo, de 24 horas a 5 dias representa um período de pequenas variações dimensionais, inferiores a 0,20 mm/m, nesse intervalo as curvas de retração se entrelaçam e não há diferenças significativas entre as mesmas, o que permite inferir que não deverão aparecer fissuras oriundas de retração, nos revestimentos dessas argamassas. A argamassa com AMis1 representou uma exceção a esse comportamento, pois já apresentou uma retração da ordem de 1,4 mm/m, extremamente elevada, aos 5 dias. Isso pode ser justificado por três fatores principais: 1º) é o agregado que possui menor massa unitária, apesar da equivalência em massa específica, o que significa que o volume de vazios é maior que os demais, com um pior arranjo de partículas; 2º) é a argamassa que possui a mais elevada relação água/materiais secos (25,5%); 3º) O cimento ainda não hidratou para conferir resistência à saída de água das argamassas, sendo assim, a argamassa ainda é plástica e sofre as deformações oriundas da variação dimensional. A combinação desses fatores permite deduzir que havia maior quantidade de poros e de água livre na argamassa nas idades iniciais e, por isso, houve uma maior tensão capilar e uma maior retração plástica.

O segundo intervalo, de cinco a dez dias, é caracterizado pela diferenciação entre as argamassas, definindo as que terão uma maior e uma menor retração; é o período de variações dimensionais da ordem de 0,50 mm/m a 1,07 mm/m. Neste intervalo a argamassa AMis1 estabiliza-se, o que pode significar que a maior parte da água livre já foi eliminada dos poros. Em contrapartida, a

argamassa ACim3 sofre a maior variação dimensional intensificada a partir do 7º dia, a variação brusca segue o mesmo padrão apresentado pela argamassa AMis1 no 1º período avaliado.

No terceiro intervalo, observa-se o início da estabilização das argamassas que ainda estavam retraindo, ANat1, ANat3 e AMis3, com variações entre 0,20 mm/m e 0,40 mm/m, em outra linha, a argamassa ACim3 retrai bruscamente e chega ao patamar da AMis1, com retração total da ordem de 1,63 mm/m.

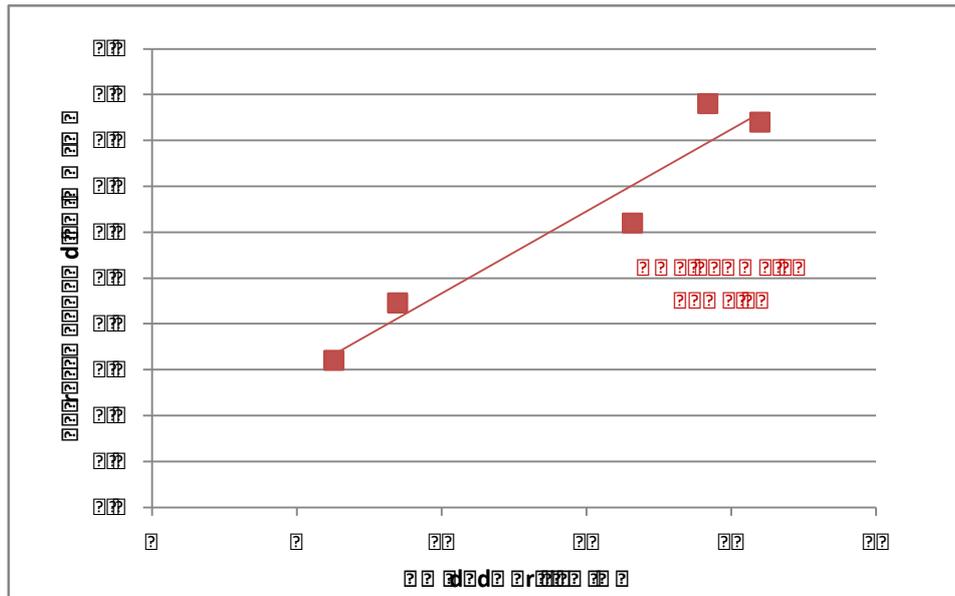
No quarto intervalo, a partir do 15º dia de moldagem dos corpos de prova não há mais variações dimensionais significativas para quaisquer das argamassas, todas permanecem invariáveis até os 28 dias, data da última medição de retração.

As argamassas produzidas por Lima (1999), com agregados reciclados de diversas origens, apresentaram retração muito superior às argamassas convencionais, independente do tipo de resíduo. O autor atribuiu o comportamento pela taxa de absorção dos resíduos e seu teor de finos. Entretanto, não houve, para os resultados avaliados nesta pesquisa, correlação entre esses fatores.

Lima (1999) esperava que a argamassa produzida com resíduos compostos unicamente por blocos de concreto apresentasse uma menor retração, quando comparada às demais, contudo, o valor obtido por ele não se aproximou da retração das argamassas convencionais, assim como nesta pesquisa.

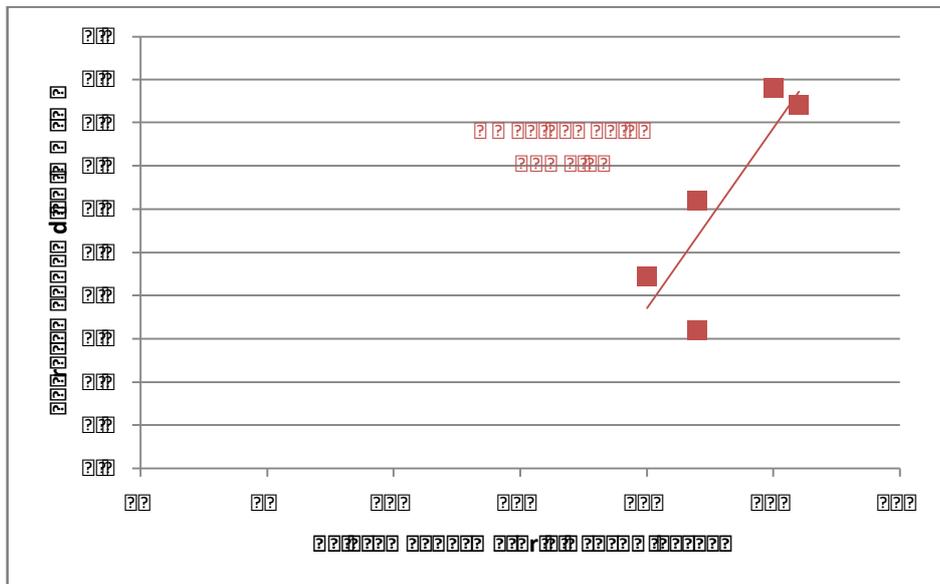
Um fator observado na presente pesquisa, que até o presente momento não foi discutido por nenhum autor, é uma correlação existente entre a Umidade Crítica e a retração aos 28 dias das argamassas, mesmo alterando-se a quantidade de água de amassamento e a consistência (Figura 4. 17).

Figura 4. 17 – Retração aos 28 dias em função da umidade crítica



Obteve-se também uma correlação significativa entre a retração total dos corpos de prova e a relação água/materiais secos das argamassas (Figura 4. 18).

Figura 4. 18 - Retração aos 28 dias em função da relação água/cimento



Da mesma forma que com a densidade de massa das argamassas, não existe correlação entre a retração e a relação água/cimento das argamassas.

4.3.2 Absorção por imersão

A média, com desvio padrão e coeficiente de variação resultados obtidos, para a absorção por imersão das argamassas aos 28 dias é apresentada na Tabela 4. 7.

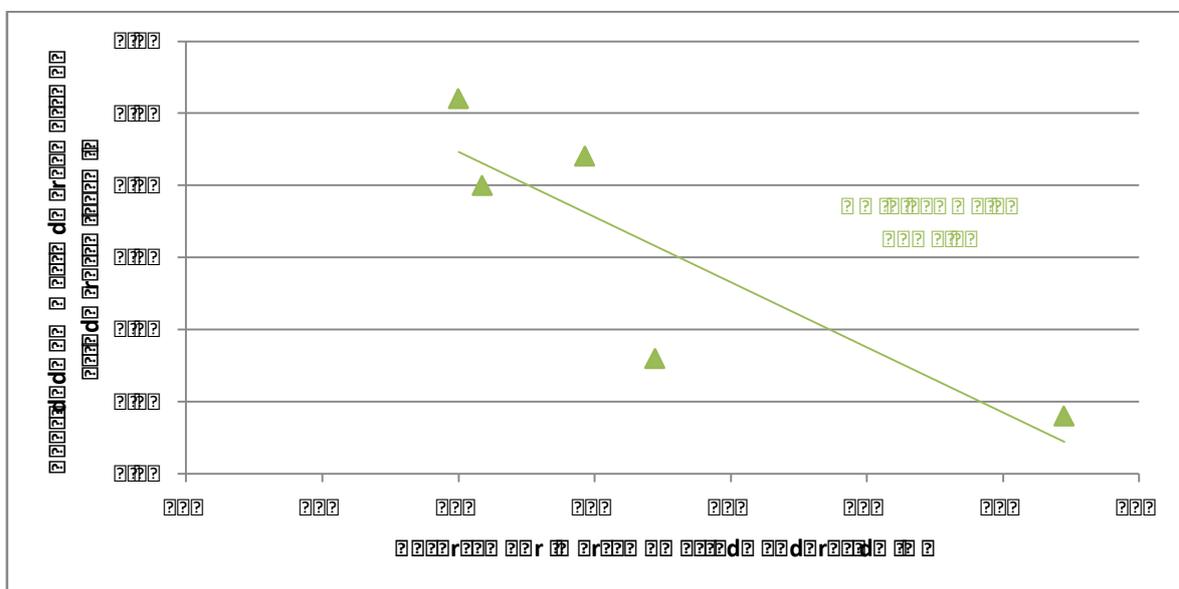
Tabela 4. 7 - Média dos resultados de absorção por imersão das argamassas no estado endurecido

Agregado	Absorção por imersão média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
ANat1	14,0%	0,4%	3,2%
ANat3	15,9%	0,3%	2,2%
AMis1	16,9%	0,2%	1,4%
AMis3	14,3%	0,1%	1,0%
ACim3	22,9%	0,4%	1,5%

Os resultados podem ser diretamente associados à porosidade, conforme descrito por Jochem (2012) e Morales (2015). Tal correlação também pode ser confirmada pela dependência entre a absorção e a densidade em massa no estado fresco das argamassas.

Conforme observado na Figura 4. 19, quanto maior a densidade no estado fresco, mais compacta será a argamassa e menor será a sua absorção por imersão no estado endurecido.

Figura 4. 19 - Absorção de água por imersão da argamassa no estado endurecido em função da densidade em massa da argamassa no estado fresco



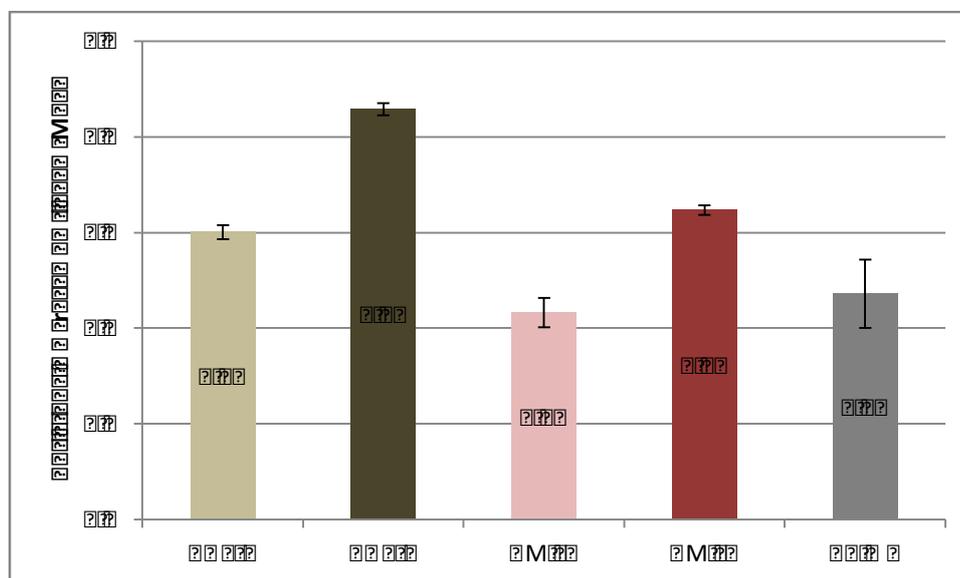
4.3.3 Resistência Mecânica

Para a resistência mecânica, os corpos de prova foram avaliados quanto à resistência à tração na flexão e resistência à compressão aos 28 dias.

As médias obtidas no ensaio de tração na flexão¹⁶, apresentados na Figura 4. 20, demonstram um decréscimo quando se compara a argamassa produzida com agregado natural (ANat1 e ANat3) com as produzidas com RCD de mesma granulometria (AMis1, AMis3 e ACim3).

Também é perceptível que quando há a redução de granulometria, para um mesmo tipo de agregado, apesar da redução do teor de finos, há prejuízo para a resistência à tração na flexão.

Figura 4. 20 – Média e desvio padrão de resistência à tração na flexão das Argamassas



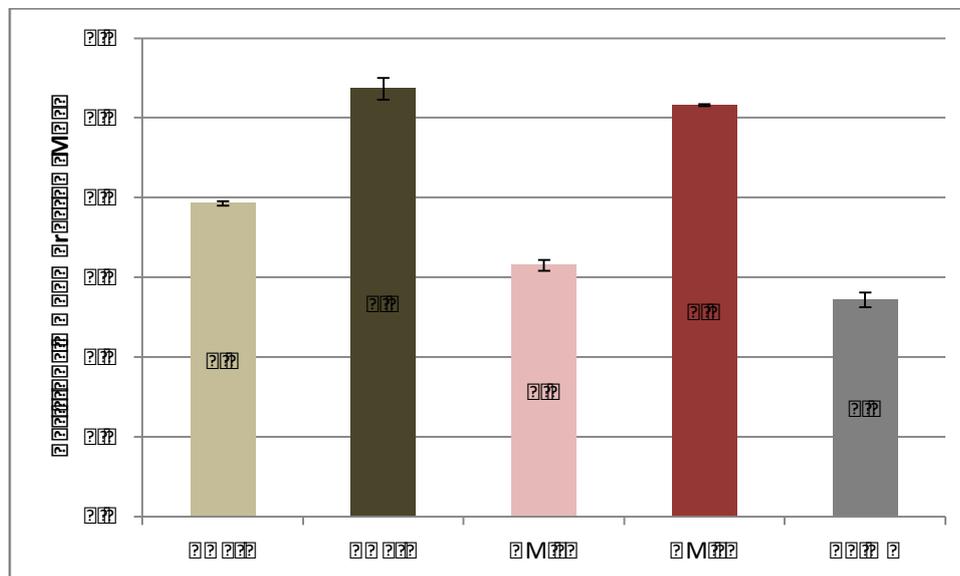
Na avaliação da resistência à tração na flexão, Antes *et al.* (2014), Jiménez *et al.* (2013) e Ledesma *et al.* (2014) obtiveram melhor resultado para as argamassas com até 50% de substituição, enquanto que Machado (2014), com argamassas produzidas utilizando 100% de agregado reciclado, percebeu uma perda de 14,62% na resistência.

Na resistência à compressão, aos 28 dias, as argamassas com resíduo também apresentaram desempenho inferior à argamassa de referência, para a mesma granulometria avaliada. A média, com indicação do desvio padrão é apresentada na Figura 4. 21. Assunção, Carvalho e Barata (2007), Antes *et al.* (2014) e Calçado (2015) encontraram um aumento na resistência à

¹⁶ Os valores individuais, média, desvio padrão e coeficiente de variação podem ser observados no Apêndice B.

compressão das argamassas produzidas com 50% de substituição do agregado natural por agregado reciclado.

Figura 4. 21 - Resistência Média à Compressão das Argamassas¹⁷



Em desacordo com os demais autores (com substituições de até 50%), quando comparadas as argamassas produzidas com a mesma faixa granulométrica (agregados passantes na peneira 3 mm) há uma perda de apenas 4% na resistência à compressão para o AMis3 e de 50% para o ACim3, em relação à areia natural (ANat3). Esta perda deve-se, em parte, a utilização da cal em substituição aos finos dos agregados reciclados, visto que a cal não é um fino inerte como os finos presentes nas argamassas com resíduos e contribui para o ganho de resistência da argamassa com agregado natural.

Entretanto, apesar da redução na resistência mecânica, pode-se considerar que a argamassa AMis3 é equivalente, em termos de resistência à compressão à argamassa produzida com areia natural, ANat3.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS

Para caracterização dos revestimentos foi realizado o ensaio de resistência de aderência à tração, aos 28 dias, e a absorção de água pelo método do cachimbo, aos 60 dias. Os resultados obtidos são discutidos nos próximos itens.

¹⁷ Os resultados individuais, média, desvio padrão e coeficiente de variação são apresentados no Apêndice B.

4.4.1 Resistência de Aderência à Tração

Para a resistência de aderência à tração das argamassas foi realizado o ensaio de arrancamento, conforme procedimento determinado na NBR 13528 (ABNT, 2013). Não foi possível a realização do ensaio para o revestimento produzido com a argamassa AMis1, devido ao descolamento dos corpos de prova no momento do corte. Os resultados médios obtidos para os demais revestimentos foram agrupadas na Tabela 4. 8. Os resultados individuais podem ser verificados no Apêndice C.

Tabela 4. 8 - Resultados médios de Resistência de Aderência à tração dos revestimentos de argamassa

Argamassa (preparo da base):	ANat 1 (Sol. Cal)	ANat 3 (Sol. Cal)	AMis 3 (Sol. Cal)	ACim 3 (Sol. Cal)	AMis 3 (Chapisco)
Média (MPa):	0,14	0,17	0,17	0,09	0,19
Desvio Padrão (MPa):	0,07	0,06	0,05	0,03	0,07
Coefficiente de Variação (%):	50	33	31	31	38
Nº de CPs acima de 0,20 MPa:	2	3	3	0	7
Ruptura predominante:	100% Sub/Ver	100% Sub/Rev	100% Sub/Rev	100% Sub/Rev	69 % Rev e 22% Sub/Cha

Na análise comparativa entre os revestimentos estudados, observa-se a elevada variabilidade dos resultados (em torno de 30 a 50%), condizente com o obtido por outros autores mesmo para as argamassas compostas apenas por cimento, cal e areia natural (CARASEK, 1996, FLORES-COLEN; BRITO; BRANCO, 2009; CANEDO; BRANDÃO; PEIXOTO FILHO, 2011; RAMOS *et al.*, 2012; CARASEK, 2012, MALAGONI; SCARTEZINI, 2013).

Quanto aos valores de resistência, o revestimento com resíduo cimentício (ACim3) apresenta o pior valor médio de aderência, também foi a argamassa com os piores resultados nas demais propriedades avaliadas.

O baixo desempenho do revestimento com ANat1 e a impossibilidade de realização do ensaio para AMis1, demonstram a inviabilidade da remoção de finos por meio do peneiramento, utilizando-se apenas agregado com diâmetro inferior a 1,18 mm, comprovando a importância da presença de partículas superiores tanto para a resistência mecânica quanto para a aderência dos revestimentos, trazendo melhor desempenho à argamassa.

Os revestimentos AMis3 e ANat3 apresentaram comportamento bastante semelhante, com valores de média e desvio padrão equivalentes, indicando que a argamassa com agregado

reciclado misto, avaliado nessa dissertação, pode substituir sem prejuízo, a areia natural para a elaboração de argamassas de revestimento.

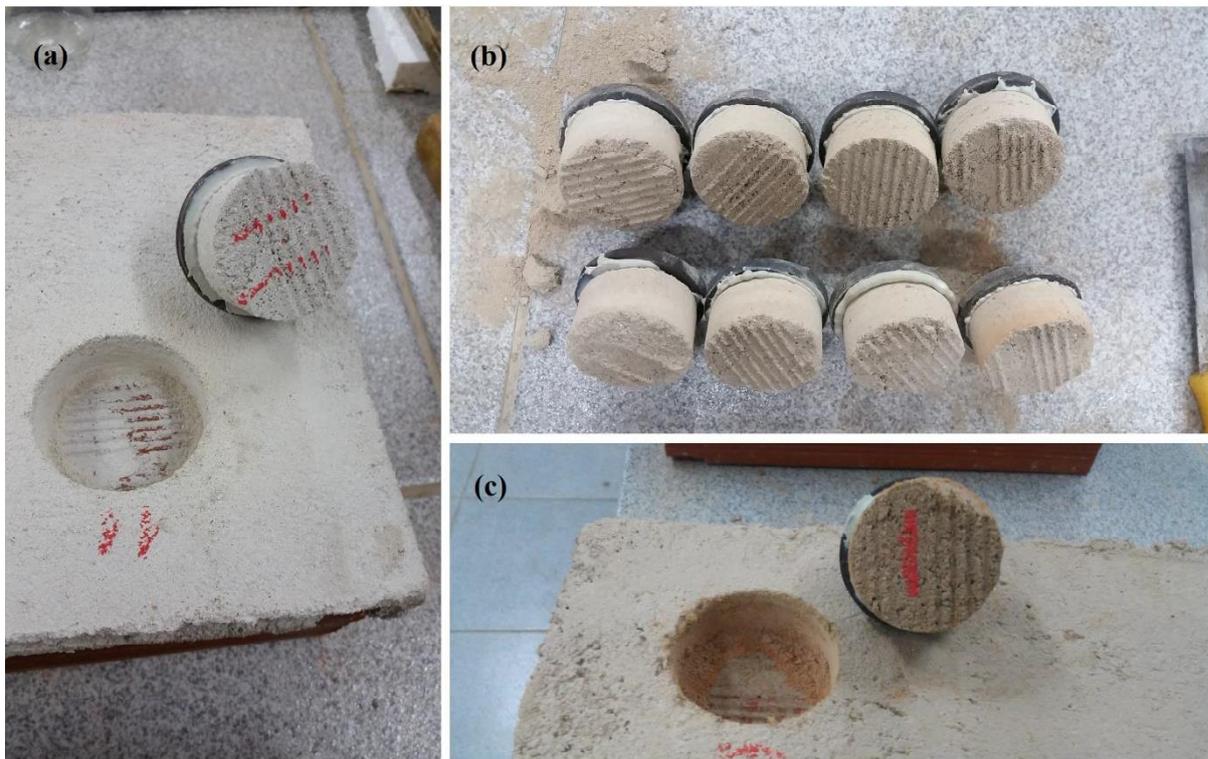
Os resultados obtidos (tanto para os revestimentos com agregado reciclado quanto para o agregado natural) ficaram aquém dos requisitos da NBR 13749 (ABNT, 2013), que é de 0,20 MPa em, no mínimo, oito de doze corpos de prova. Apesar desses valores parecerem baixos, eles são compatíveis com os valores que vem sendo obtidos com os revestimentos executados com as argamassas convencionais (areia natural) aplicados sobre blocos cerâmicos nas obras de Goiânia e Brasília, de acordo com levantamento feito por Malagoni e Scartezini (2013).

Outro fator importante a destacar é que, ao se avaliar os corpos de prova do arrancamento dos revestimentos aplicados sobre os blocos com a solução de cal, o tipo de ruptura foi exclusivamente adesivo, ou seja, todos os rompimentos ocorreram 100% na interface substrato/argamassa.

Conforme Carasek (2012), quando a ruptura é do tipo coesiva, ocorrendo no interior da argamassa ou do substrato, os valores são menos preocupantes, a menos que sejam muito baixos. Por outro lado, quando a ruptura é do tipo adesiva, ou seja, ocorre nas interfaces do sistema (como no caso em questão), os valores devem ser mais elevados, pois existe um maior potencial para a ocorrência de manifestações patológicas futuras.

Na Figura 4. 22 podem ser observadas as características de rompimento dos corpos de prova arrancados no ensaio de resistência de aderência à tração.

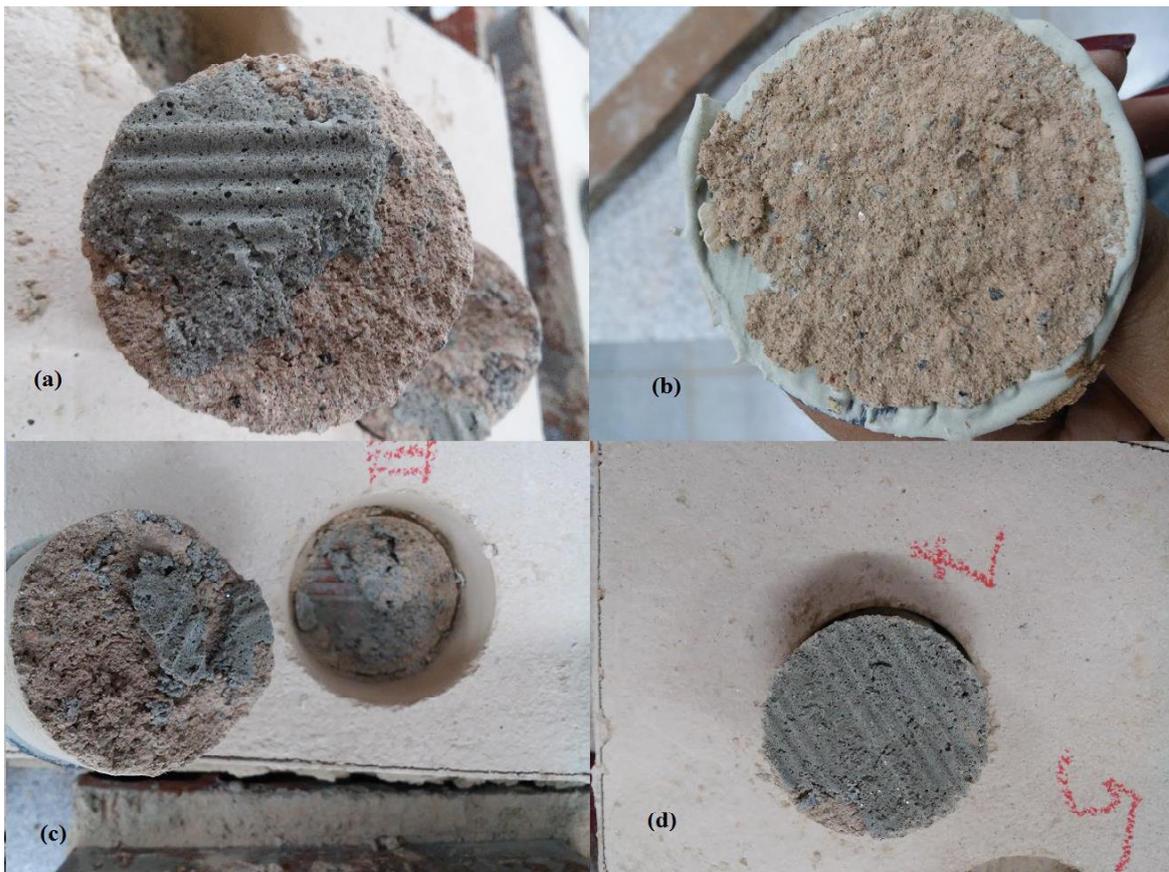
Figura 4. 22 - Forma de ruptura dos corpos de prova no ensaio de resistência de aderência à tração.



Assim, constatou-se que o preparo da base com a solução de cal não permitiu atingir os valores mínimos de norma para o bloco empregado na presente pesquisa. Isto não significa que este tipo de preparo não tenha contribuído para a aderência, uma vez que não foram testados revestimentos aplicados diretamente sobre os blocos cerâmicos (sem nenhum preparo). Diante dessa verificação, realizou-se novo preparo de base, substituindo-se a solução de cal por chapisco e aplicando-se apenas o revestimento AMis3 (para o qual se admitiu equivalência de valores com o revestimento referência, ANat3). Nesse caso, observou-se então uma elevação da resistência média de aderência à tração para 0,19 MPa e obteve-se sete resultados acima do estabelecido pela NBR 13749 (ABNT, 2013) para ambientes internos, o que ficou muito próximo do mínimo de norma.

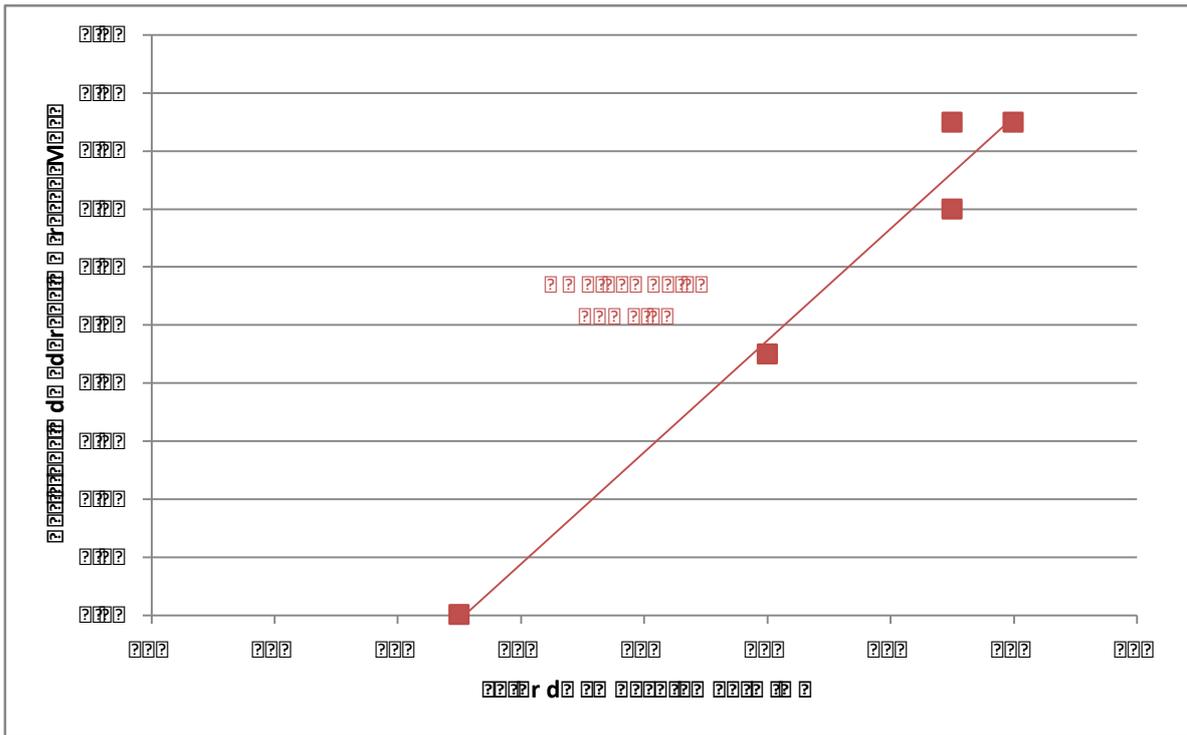
Outra mudança significativa foi quanto à forma de ruptura observada nos revestimentos, que passou a ocorrer mais frequentemente na argamassa (58%), o que é mais positivo. Na Figura 4. 23 observa-se as formas de ruptura que ocorreram para o revestimento aplicado no bloco tratado com chapisco.

Figura 4. 23 - Novas formas de ruptura com a utilização de chapisco (a) interface argamassa-chapisco e chapisco-bloco; (b) argamassa (c) interface argamassa-chapisco e argamassa e (d) interface chapisco-bloco



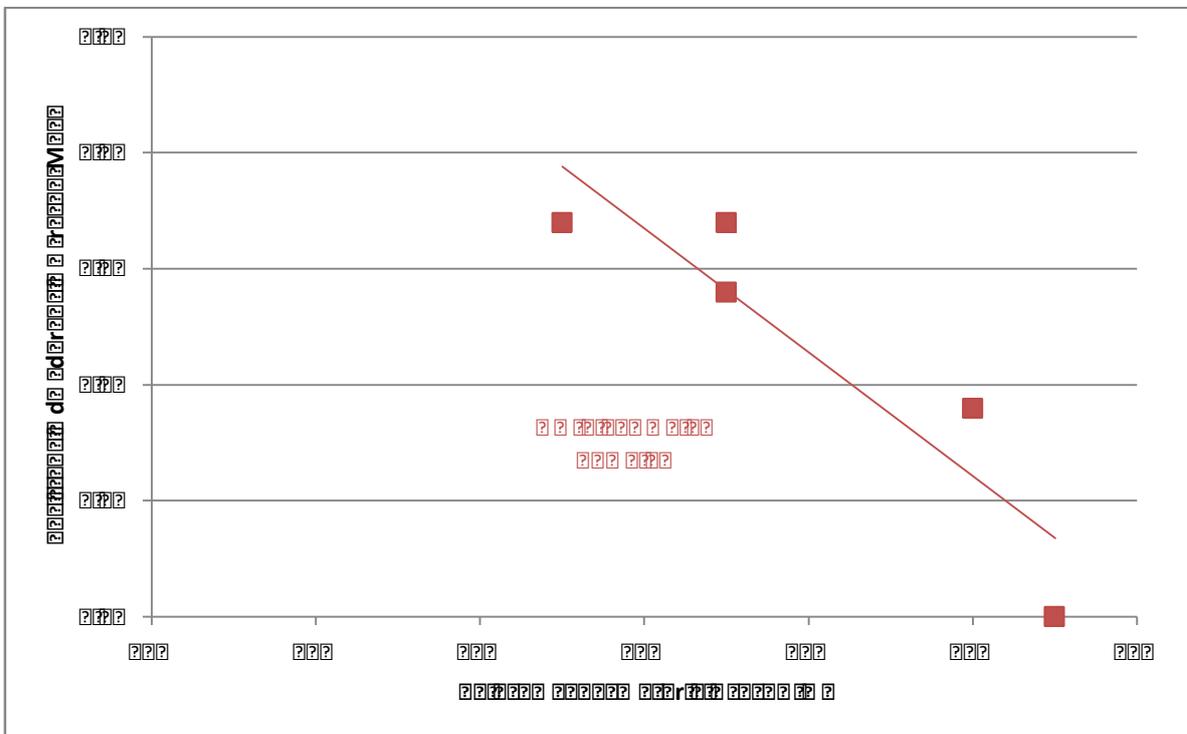
Além disso, é interessante observar as conexões encontradas com as variações das propriedades dos agregados e das argamassas no estado fresco. A resistência de aderência à tração é altamente relacionada do fator de empacotamento do agregado, para as mesmas condições de preparo da base (Figura 4. 24), de forma que, ao se aumentar o fator de empacotamento dos grãos (dependente da massa unitária e massa específica) aumenta-se, também, a aderência.

Figura 4. 24 – Resistência de aderência dos revestimentos em função do fator de empacotamento dos agregados



O comportamento inverso ocorre com a relação água/materiais secos, gerando tendência descendente, como se observa na Figura 4. 25.

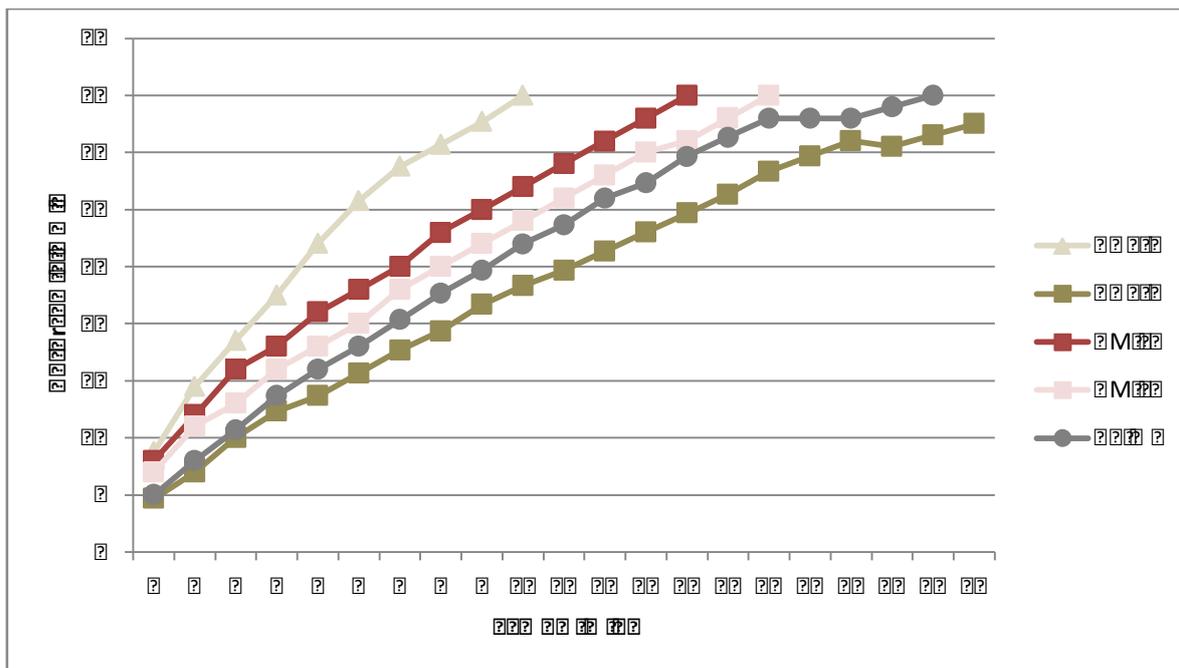
Figura 4. 25 - Resistência de aderência à tração em função da relação água/materiais secos



4.4.2 Absorção de água pelo método do cachimbo

Na Figura 4. 26 são apresentados os resultados médios do ensaio de absorção/permeabilidade de água obtido pelo método do cachimbo, tendo sido realizados quatro pontos válidos para cada um dos revestimentos aos 60±10 dias (cujos resultados individuais estão apresentados no Apêndice C).

Figura 4. 26 - Absorção de água do revestimento ao longo do tempo medida pelo método do Cachimbo



Entre os revestimentos, a menor absorção/permeabilidade foi para o revestimento produzido com ANat3, o que era esperado devido à presença de cal e menor relação água/materiais secos desse material. A tendência não permanece para os demais revestimentos, sendo que o ACim3 apresentou o pior desempenho das demais propriedades e possui a menor absorção de água dentre os revestimentos com resíduo.

O ensaio de absorção pelo método do cachimbo não obteve correlação linear significativa (R^2 acima de 0,50), com nenhuma outra propriedade das argamassas ou dos agregados.

4.5 CLASSIFICAÇÃO GERAL DAS ARGAMASSAS E REVESTIMENTOS

No Brasil, a NBR 13281 (ABNT, 2005), apresenta requisitos exigíveis para argamassa utilizada em assentamento e revestimento de paredes e tetos, e será utilizada para a comparação dos resultados obtidos para os materiais produzidos nessa pesquisa.

Os parâmetros para os quais a NBR 13281 (ABNT, 2005) estabelece valores e foram analisados são densidade no estado fresco, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e resistência de aderência à tração. Os resultados médios, para estas propriedades, obtidos na pesquisa são apresentados na Tabela 4. 9, juntamente com a classificação destas.

Tabela 4. 9 - Comparativo entre os valores obtidos e as faixas determinadas pela NBR 13281 (ABNT, 2005)

Tipo de agregado	Densidade (g/dm ³)		Resistência à tração na flexão (MPa)		Resistência à compressão (MPa)		Resistência de aderência à tração (MPa)	
	A	B	A	B	A	B	A	B
ANat1	2,01	D5	1,50	R2	3,9	P3	0,14	A1
ANat3	1,97	D4	2,15	R3	5,4	P4	0,17	A1
AMis1	1,83	D4	1,08	R1	3,2	P3	0,00	-
AMis3	1,95	D4	1,62	R3	5,2	P4	0,17	A1
ACim3	1,79	D4	1,18	R1	2,7	P2/P3	0,09	A1

A = Valor Obtido na realização do ensaio para as argamassas.

B = Letra de classificação de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005)

De acordo com a classificação obtida para as argamassas (compilada na Tabela 4. 9), é notável que a argamassa produzida com resíduo misto (AMis3) e com areia natural (ANat3), estão contidas nas mesmas faixas determinadas pela norma, o que permite afirmar que o comportamento dessas argamassas é equivalente.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas na pesquisa experimental, bem como as sugestões para futuras pesquisas no tema.

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos apontaram para três linhas distintas e complementares de conclusões: as características do material enquanto agregado e sua influência no comportamento das argamassas (no estado fresco e endurecido) e no desempenho dos revestimentos.

5.1.1 Caracterização dos agregados

Os tópicos seguintes apresentam as principais conclusões obtidas na análise dos resultados relativos à caracterização dos agregados:

- As curvas granulométricas dos agregados reciclados estudados (misto e cimentício) são muito semelhantes, para um mesmo processo de produção, indicando que o equipamento de moagem tem tanta influência no dimensionamento e distribuição das partículas quanto a composição do resíduo;
- O teor de finos totais plastificantes deve ser adotado na formulação do traço das argamassas com resíduos, visto que a quantidade de materiais pulverulentos (parcela menor que 75 μ m) é de três a quatro vezes superior nos agregados reciclados. Além disso, as dimensões dos finos nos agregados reciclados são inferiores às do agregado natural.
- O peneiramento mostrou-se uma solução viável para a melhoria da sustentabilidade na reciclagem de RCD, evitando o consumo elevado de água para lavagem, garantindo a remoção dos finos desses agregados. Quanto menor a abertura das peneiras utilizadas para a passagem do material maior foi a redução do teor de material pulverulento, entretanto, se a dimensão máxima dos grãos for igual ou inferior a 1,18 mm há prejuízos no comportamento das argamassas por eles produzidas;

- A absorção de água dos agregados mostrou-se diretamente proporcional ao teor de material pulverulento, devido a maior superfície específica que é gerada pela presença dos materiais de menor granulometria;
- A análise morfológica dos grãos evidenciou que os agregados de RCD estão nas mesmas faixas de esfericidade que a areia natural, indicando a eficiência no processo de produção dos agregados reciclados;
- O coeficiente de inchamento e a umidade crítica foram muito superiores nos agregados reciclados, apresentando um comportamento gráfico diferenciado quando comparado ao agregado natural, em que inicialmente não há percepção de inchamento nas areias, retardando o início do inchamento até teores de umidade de 5% a 7%.

Diante da avaliação dos tópicos relativos à caracterização dos agregados, percebeu-se que é necessário avaliar o agregado incorporado às argamassas, buscando compreender a influência dessas características no comportamento das argamassas.

5.1.2 Argamassas no estado fresco

Quanto à influência dos agregados nas argamassas no estado fresco destaca-se que:

- A relação água/materiais secos mostrou-se superior nas argamassas produzidas com agregados reciclados, que é diretamente proporcional ao fator de empacotamento. Não houve correlação entre a relação água/materiais secos e a absorção dos agregados ou o teor de finos;
- Sugere-se que não seja acrescentada cal nos revestimentos compostos por materiais com elevados teores de material pulverulento, pois estes já desempenham o papel de plastificantes;
- A densidade de massa das argamassas no estado fresco é menor quando se utiliza os agregados reciclados e demonstrou ser diretamente proporcional à massa unitária dos agregados e inversamente proporcional à relação água/materiais secos das argamassas, o que é benéfico para a ergonomia no momento da aplicação dos revestimentos;

A interação entre as características dos agregados e o comportamento das argamassas no estado fresco, permite deduzir que o arranjo dos grãos pode superar a maior superfície específica presente nos agregados reciclados devido ao elevado teor de finos, desde que se

tenha os devidos cuidados em relação ao traço e ao teor de finos totais plastificantes das argamassas.

5.1.3 Argamassas no estado endurecido

Avaliando as argamassas no estado endurecido, os resultados demonstraram que:

- A retração das argamassas mostrou-se altamente dependente da umidade crítica e do inchamento das areias utilizadas, o que pode auxiliar na seleção dos materiais a serem utilizados nas argamassas, possibilitando a previsão do surgimento de fissuras, devido à retração;
- Há uma equivalência de valores quando são comparados os resultados de resistência à compressão obtido na avaliação das argamassas produzidas com agregado reciclado misto e areia natural, com dimensões máximas de 3mm, indicando que, apesar da maior relação água/materiais secos a argamassa produzida com agregado reciclado misto tem comportamento similar à argamassa de referência;
- Na resistência à tração na flexão a argamassa com areia natural 3 mm apresentou resultados superiores às demais, entretanto, na mesma faixa de classificação da normalização brasileira da argamassa produzida com agregado reciclado misto de mesma granulometria;
- A absorção total de água mostrou-se ser inversamente proporcional à densidade de massa das argamassas no estado fresco. Os resultados foram semelhantes para todas as argamassas, exceto para a produzida com agregado cimentício, que apresentou absorção muito superior às demais.

No estado endurecido as propriedades das argamassas diferenciaram-se. O comportamento da argamassa com agregado reciclado misto com dimensão 1,18 mm demonstrou que a redução do teor de finos não é o fator mais importante para obtenção de um agregado eficiente, sendo que, para um material com a mesma composição, uma maior quantidade de material pulverulento, acrescido da presença de partículas maiores (até 3 mm), apresenta desempenho muito superior.

Ao finalizar essa análise, percebeu-se que, no desenvolver dos ensaios, as argamassas compostas de resíduo misto e de areia natural com dimensões máximas de 3 mm

apresentaram comportamento semelhante no estado endurecido, apesar das diferenças entre os agregados. A única semelhança entre os grãos foi a interação entre as partículas, permitindo afirmar que essas características (índice de vazios, porosidade e fator de empacotamento) são determinantes para o comportamento das argamassas.

5.1.4 Caracterização dos revestimentos

Quanto ao desempenho dos revestimentos, as considerações são as seguintes:

- O preparo dos blocos cerâmicos, tanto com solução de cal, quanto com chapisco, não se mostrou muito satisfatório para aplicação dos revestimentos quando comparados aos valores prescritos por norma, o que permite inferir que o problema de aderência pode ser devido aos blocos utilizados, que estavam no limite máximo de absorção de água total estabelecido pela norma brasileira;
- Nos estudos preliminares, o teor de finos totais plastificantes (menores que 75 μm), nas argamassas, mostrou-se diretamente proporcional à resistência de aderência, de forma que, ao reduzir o teor de finos para menos de 20% não há aderência satisfatória nos revestimentos, enquanto que as argamassas com média de 28% obtiveram êxito para a realização do ensaio. Vale ressaltar que o excesso de finos exige uma maior quantidade de água de amassamento, que é inversamente proporcional a aderência, sendo necessário, portanto, uma dosagem que proporcione o equilíbrio dessas duas características;
- Foram encontradas correlações entre a resistência de aderência à tração e o fator de empacotamento, o que pode fornecer parâmetros para a utilização dos agregados reciclados em revestimentos. Os valores de 0,53 e 0,54 foram os mais satisfatórios no desempenho, enquanto que um fator de 0,45 impossibilitou inclusive a realização do ensaio.
- O pior desempenho, para as argamassas que puderam ser ensaiadas quanto à resistência de aderência à tração, foi a produzida com agregado cimentício, que possui fator de empacotamento 0,50. Sendo assim, sugere-se que, na avaliação dos agregados reciclados, apenas os que possuem fator de empacotamento acima de 0,50 sejam utilizados nos revestimentos;

Ficou confirmado que a interação entre as partículas, especialmente o fator de empacotamento, são as propriedades que apresentam maior correlação com o desempenho dos revestimentos, e deverão ser avaliadas na escolha do agregado reciclado. Além destas, é de grande importância ter conhecimento sobre a origem dos agregados reciclados, fator determinante nas características dos agregados.

Como **conclusão geral** da avaliação dos agregados reciclados na substituição total da areia natural, comprovou-se que o agregado misto de 3 mm (que possui a maior variabilidade de resultados na literatura) utilizado nesta pesquisa, mostrou-se viável tecnicamente para a elaboração de argamassas de revestimento apenas com RCD (sem areia natural em sua composição), uma vez que tanto as argamassas (estado fresco e endurecido), como os revestimentos aplicados apresentaram características e desempenho equivalentes aos produzidos com areia natural.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como o foco deste trabalho era a substituição total do agregado natural por agregado reciclado, limitado aos produtos disponíveis na região metropolitana de Goiânia-GO, as avaliações realizadas não esgotaram o assunto, surgindo demandas para novas pesquisas a serem realizadas, as quais são sugeridas:

- A substituição apenas das parcelas com diâmetros menores que 1,18 do agregado natural por agregado reciclado, mesclando o desempenho obtido para as argamassas produzidas;
- Avaliação da influência da densidade em massa das argamassas com agregados reciclados na produtividade dos trabalhadores, identificando se há redução da RUP e outros benefícios para as empresas, além dos ambientais e da redução de custo com agregados.
- Avaliação das possíveis reações pozolânicas dos grãos dos agregados reciclados e sua contribuição para as argamassas;
- Ampliação da avaliação da absorção de água pelo método do cachimbo nos revestimentos contendo RCD, buscando correlações com outras propriedades dos agregados ou argamassas;

- Avaliação comparativa entre agregados reciclados de concreto, de diversas origens, verificando a influência da origem do RCD cimentício no desempenho dos revestimentos;
- Avaliação, por meio de lupa estereoscópica, da extensão de aderência dos revestimentos produzidos com RCD, comparando-a com argamassas com agregados naturais.

REFERÊNCIAS

ASTM: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 897/83**. Specification for aggregate for job-mixed Portland. *In*: Anual Book of ASTM Standards. Easton, ASTM, 1983.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT _____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT _____. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

ABNT _____. **NBR 12826**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT _____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002.

ABNT _____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT _____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e o teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT _____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT _____. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT _____. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, 1996.

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

ABNT _____. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (Retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

ABNT _____. **NBR 15270-3**: Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

- ABNT _____. **NBR NM 14:** Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2001.
- ABNT _____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- ABNT _____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- ABNT _____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT _____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT _____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT _____. **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT _____. **NBR NM 76:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.
- ABNT _____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ABRELPE: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012**. Abrelpe. São Paulo, SP, 2013.
- ALMEIDA DIAS, L.; CARASEK, H. Avaliação da permeabilidade e da absorção de água de revestimentos de argamassa pelo método do cachimbo *In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, 2003, Santa Catarina. **Anais...** Brasil, 2003.
- ANGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- ANGULO, S. C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C.; KALUN, H. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. *In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável – X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, São Paulo, 2004. **Anais...** São Paulo, ENTAC, 2004.
- ANGULO, S.C.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V.M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. *In: IV SEMINÁRIO “DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL – MATERIAIS*

RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES”, 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo, IBRACON, 2001. p 43-56

ANTES, L.H.; PIRES, A.L.; RUDEK, S.; SCHERER, R.G.; FELIPETO, R.G.; OLIVEIRA, R.P.; GASTALDINI, A.L.G. Análise do comportamento mecânico de argamassas endurecidas com substituição de areia por RCD. *In: XXVI CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA & TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA (CRICTE)*, 2014, Alegrete. **Anais...** Rio Grande do Sul, 2014.

ANEPAC: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. www.anepac.org.br. Acesso em 24 de abril de 2016.

ARAÚJO, G.S.; BICALHO, K.V.; TRISTÃO, F.A. Análise de imagens na determinação da forma e textura de areias. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. vol. 39 n.º.1 Viçosa Jan./Feb. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20150274>

ARAÚJO, R.C. **Avaliação da viabilidade do emprego do ensaio cisalhamento direto para caracterização reológica de argamassas**. 2015. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2015.

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

BAVARESCO, C.R. **Utilização de entulho reciclado para produção de argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, nº 136, 17 de julho de 2002.

BRASIL. Lei nº 11.145, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis n. 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, nº 5, 08 de janeiro de 2007.

BRASIL. LEI Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.

BS: BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1199**: Specifications for building sands from natural sources. London, 2014.

BUTTLER, A.M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 220

f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de Estruturas de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CANEDO, A. C.; BRANDÃO, F. B.; PEIXOTO FILHO, F. L. **Reaproveitamento de resíduo de construção na produção de argamassa de revestimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás. Goiânia: UFG, 2011.

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

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 4ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Vol1. 512 p.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos**: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. 1996. 285p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARASEK, H. **Cap. 26 – Argamassas**. In: ISAIA, G. *Materiais de construção civil: princípios de ciência e engenharia de materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

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

CARASEK, H.; ARAÚJO, R.C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**. 2016. (no prelo).

CARNEIRO, A.M.P.; CINCOTTO, M.A. **Dosagem de argamassas a partir de curvas granulométricas**. São Paulo, EPUSP, 1999. 14p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/237. São Paulo, 1999.

CARVALHO, P. E. F. ; CARASEK, H. Aplicação do método de cálculo de volumes teóricos para o estudo de argamassas com fibras de papel de embalagens de cimento. In: X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2013, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2013. v. 1. p. 117.

CBIC: CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. www.cibic.org.br. Acesso em 24 de abril de 2016.

CEN: COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN 1015-12:2000**: Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates. Bélgica, 2000.

CELESTINO, P.H.M. **Produção de blocos de concreto em obra com utilização de resíduo cimentício como agregado**. 2013. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

CORINALDESI, V. Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. **Cement & Concrete Composites** 31: Elsevier, 2009.

CORINALDESI, V.; MARICONI, G. Behavior of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. **Construction and Building Materials**: Elsevier, 2009.

FERREIRA, G.E.; PEREIRA, L.S. **Mercado de Agregados no Brasil**. In: ALMEIDA, S.L.M.; LUZ, A.B. Manual de Agregados para a Construção Civil. 1. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. 245p.

FLORES-COLEN, I.; BRITO, J.; BRANCO, F. In situ adherence evaluation of coating materials. **Experimental Techniques**, V. 33, n.º 3, SEM, May/June, 2009. p. 51-60.

GARCIA, L.F.S.; DIAS, N. G.; ALVES, R. D. **Estudo em obra da reutilização de resíduos de argamassas na produção de novos revestimentos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás. Goiânia: UFG, 2013.

GONÇALVES, P.H. **Planejamento e gerenciamento do resíduo sólido de construção e demolição – estudo de casos goianos**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

GONÇALVES, P. H.; BRANDSTETTER, M. C. G. Ferramenta de análise para o gerenciamento de resíduos da construção e demolição. **Conexão Academia**, v. 3, p. 11-20, 2013.

GRIGOLI, A.S. Entulho de obra: reciclagem e consumo na própria obra que o gerou. In: VII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Salvador, BA, 2000. **Anais...** ANTAC: Salvador, BA, 2000. v. 2 p.1034-1042.

IBGE: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. www.ibge.gov.br. Acesso em 24 de abril de 2016.

JIMENEZ, J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNANDÉZ, J. M.; BRITO, J. de. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**: Elsevier, 2013.

JOCHER, L.F. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: Características físicas e propriedades da microestrutura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

LAPA, J. S. **Estudo de viabilidade técnica de utilização em argamassa do resíduo de construção oriundo do próprio canteiro de obra**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

LEDESMA, E. F.; JIMÉNEZ, J. R.; FERNANDÉZ, J. M.; GALVIN, A. P.; AGRELA, F.; BARBUDO, A. Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials** 71: Elsevier, 2014.

LEVY, S.M.; HELENE, P.R.L. Reciclagem de entulhos na construção civil, a solução política e ecologicamente correta. *In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, 1995, Brasil. **Anais...** SBTA, 1995.

LEVY, S.M.; HELENE, P.R.L. **Vantagens e desvantagens de argamassas produzidas com entulho de obra, finamente moído**. 1997. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1997.

LIMA, F. M. R. S. **A formação da mineração urbana no brasil – reciclagem de RCD e a produção de agregados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo – Escola Politécnica. São Paulo: USP, 2013.

MALAGONI, M.A.; SCARTEZINI, V. **Análise dos resultados de resistência de aderência em revestimentos de argamassa**. 2013. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2013.

MACHADO, S. F. M. **Influência de agregados provenientes de RCD e cinza volantes não conformes no desempenho de argamassa de cimento**. Dissertação. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciência e Tecnologia. Lisboa: UNL, 2014.

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** p. 176 a 188, 2013.

MARTÍNEZ, I.; ETXEBERRIA, M.; PAVON, E.; DÍAS, N. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. **Construction and Building Materials** 49: Elsevier, 2013.

MENDES, T. M. **Influência do coeficiente de atrito entre os agregados e da viscosidade da matriz no comportamento reológico de suspensões concentradas heterogêneas**. 2008. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

MESQUITA, A.S.G. Análise da geração de resíduos sólidos da construção civil em Teresina, Piauí. **Holos**, Brasil, ano 28, vol. 2, 2012.

MIRANDA, L.F.R. **Estudos de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. 2000. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

MIRANDA, L.F.R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil**. 2005. 473 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S.; Avaliação de argamassas com entulhos reciclados por procedimentos racionais de dosagem. *In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, 1999, Vitória-ES. **Anais...** Brasil, SBTA, 1999.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate reinterings: parte 1 – análise of the effect of materials finer than 75 μm on mortar properties. **Construction and Building Materials** n. 20, p. 615-624: Elsevier, 2006.

MORALES, B.R.S.C. **Avaliação da influência das frações de agregado reciclado nas propriedades das argamassas de revestimento**. 2015. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2015.

NENO, C.J.F. **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão: Integração de RCD**. 2010. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 1997. 2º ed., 828 p.

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

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

PINTO, T.P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

QUARCIONI, V.A., CHOTOLLI, F.F., ANGULO, S.C., GUILGE, M., CAVANI, G.R., CASTRO, A.L., CINCOTTO, M.A. “Estimativas da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes”. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.9, n.4, p. 175-187, out/dez. 2009.

RAMOS, N.M.M.; SIMÕES, M.L.; DELGADO, J.M.P.Q.; DE FREITAS, V. P., Reliability of the pull-off test for in-situ evaluation of adhesion strength. **Construction and Building Materials**, 2012; 31: 86-93.

RIBEIRO, I; ANGELIM, R. R.; GUIMARÃES, R. C. Análise Granulométrica de Solos Tropicais com Granulômetro a Laser. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG*. **Anais...** ABMS: Goiânia-GO. 2014.

SEMARH – SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Plano de Resíduos Sólidos do Estado de Goiás: Elaboração do Panorama Geral dos Resíduos**

Sólidos. 2014. Disponível em: <http://www.egov.go.gov.br/secima/parteum.pdf> (Acesso em 01/06/16).

SELMO, S.M.S. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios. São Paulo, 1989. 202p.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1989.

SILVA, E. C. R.; BEZERRA, A. J.; SILVA, C. F. C.; MIRANDA, L. F. R. Desempenho de revestimento de argamassa com areias recicladas produzidas em canteiros de obras. IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa. Belo Horizonte, 2011. **Anais...** Brasil, SBTA, 2011.

SILVA, J; BRITO, J. D.; VEIGA, R. Recycled red-clay ceramic construction and demolition waste for mortars production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2010.

SILVA, R. P.; BARROS, M. M. S. B.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, *dopping ball* e *squeeze flow*. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologias de Argamassas. Florianópolis, 2005. **Anais...** Brasil, SBTA, 2005.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição.** 2011. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

ULSEN, C.; KAHN, H; ANGULO, S. C; JOHN, V. M.; HAWLITSCHKEK, H. Separabilidade de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição de diferentes origens. **Holos**, ano 30, vol. 3, edição especial, 2010.

APÊNDICE A

CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados individuais para alguns dos parâmetros utilizados para a determinação das características gerais dos agregados.

Tabela A 1- Teor de umidade e índice de inchamento dos agregados.

Teor de umidade (%)	Coeficiente de Inchamento				
	ANat1	ANat 3	AMis1	AMis3	ACim3
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,5	1,07	1,02	1,00	0,97	1,01
1	1,15	1,12	1,00	0,98	0,98
2	1,22	1,12	1,01	1,02	0,97
3	1,29	1,32	1,01	1,02	0,98
4	1,30	1,43	1,03	1,04	1,00
5	1,34	1,41	1,02	1,12	1,03
7	1,35	1,44	1,05	1,19	1,09
9	1,36	1,49	1,10	1,34	1,18
12	1,37	1,52	1,23	1,55	1,25
15		1,36	1,36	1,58	1,38
18		1,24	1,50	1,66	1,46
21		1,22	1,54	1,62	1,54
24			1,50	1,46	1,44
27			1,45		

Tabela A 2- Média dos resultados de análise morfoscópica por faixa granulométrica das amostras de grãos.

# Peneira (mm)	% Retido	Média de resultados para dez grãos de cada amostra		
		Índice de Forma	Esfericidade	<i>f-circle</i>
ANat1				
1,18	0,6	0,69	0,84	0,83
0,60	48,0	0,61	0,77	0,79
0,30	27,6	0,62	0,79	0,81
0,15	18,6	0,61	0,79	0,81
0,075	4,4	0,64	0,81	0,86
Fundo	0,8	0,63	0,78	0,80
Média:		0,62	0,78	0,80
Desvio Padrão:		0,03	0,02	0,02
Coef. de Variação:		4%	3%	3%

Tabela A 2- Média dos resultados de análise morfoscópica por faixa granulométrica das amostras de grãos.
(CONTINUAÇÃO)

# Peneira (mm)	% Retido	Média de resultados para dez grãos de cada amostra		
		Índice de Forma	Esfericidade	<i>f-circle</i>
ANat3				
2,36	0,40	0,64	0,80	0,81
1,18	6,00	0,69	0,84	0,83
0,60	26,00	0,61	0,77	0,79
0,30	28,00	0,62	0,79	0,81
0,15	31,00	0,61	0,79	0,81
0,075	7,60	0,64	0,81	0,86
Fundo	1,00	0,63	0,78	0,80
Média:		0,62	0,79	0,81
Desvio Padrão:		0,03	0,02	0,02
Coef. de Variação:		4%	3%	3%
ACon3				
2,36	1,00	0,63	0,78	0,81
1,18	19,60	0,63	0,78	0,83
0,60	22,00	0,68	0,82	0,87
0,30	19,40	0,64	0,80	0,73
0,15	20,80	0,69	0,84	0,85
0,075	11,80	0,66	0,82	0,82
Fundo	5,40	0,52	0,76	0,77
Média:		0,65	0,81	0,82
Desvio Padrão:		0,05	0,03	0,05
Coef. de Variação:		8%	3%	6%
AMis1				
1,18	0,80	0,65	0,80	0,77
0,60	28,80	0,67	0,80	0,83
0,30	22,80	0,60	0,74	0,81
0,15	26,60	0,67	0,82	0,85
0,075	18,40	0,61	0,78	0,80
Fundo	2,60	0,60	0,80	0,78
Média:		0,64	0,79	0,82
Desvio Padrão:		0,03	0,03	0,03
Coef. de Variação:		5%	3%	3%
AMis3				
2,36	2,00	0,65	0,81	0,81
1,18	19,00	0,65	0,80	0,77
0,60	21,40	0,67	0,80	0,83
0,30	17,80	0,60	0,74	0,81
0,15	20,80	0,67	0,82	0,85
0,075	12,00	0,61	0,78	0,80
Fundo	7,00	0,60	0,80	0,78
Média:		0,64	0,79	0,81
Desvio Padrão:		0,03	0,03	0,03
Coef. de Variação:		5%	3%	3%

APÊNDICE B

ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Neste apêndice serão apresentadas tabelas contendo os resultados individuais obtidos na avaliação das argamassas no estado endurecido, com suas respectivas médias, desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (CV) para as argamassas no estado endurecido.

Tabela B 1 - Resultados individuais para a resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas.

Argamassa	CP-01 (MPa)	CP-02 (MPa)	CP-03 (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
ANat1	1,61	1,40	1,49	1,50	0,04	2,5%
ANat3	2,28	2,02	2,14	2,15	0,03	1,5%
AMis1	1,15	1,13	0,97	1,08	0,08	7,1%
AMis3	1,49	1,70	1,66	1,62	0,03	1,6%
ACim3	1,33	1,31	0,90	1,18	0,18	15,2%

Tabela B 2 - Resistência à compressão aos 28 dias (resultados individuais).

Arga- massa	CP-01 (MPa)	CP-02 (MPa)	CP-03 (MPa)	CP-04 (MPa)	CP-05 (MPa)	CP-06 (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
ANat1	3,5	3,8	4,0	4,3	3,9	4,1	3,9	0,03	0,7%
ANat3	5,4	6,0	5,5	5,8	5,3	4,1	5,4	0,14	2,5%
AMis1	3,3	3,1	3,3	2,8	3,5	3,1	3,2	0,07	2,1%
AMis3	5,0	5,6	4,8	5,1	5,3	5,2	5,2	0,01	0,2%
ACim3	2,9	2,9	3,0	2,9	2,3	2,3	2,7	0,09	3,4%

Tabela B 3 - Média dos valores de retração individuais para as argamassas.

IDADE	ANat1 (mm/m)	ANat3 (mm/m)	AMis1 (mm/m)	AMis3 (mm/m)	ACim3 (mm/m)
2	0,06	0,07	0,17	0,04	0,05
3	0,07	0,06	0,44	0,09	0,06
4	0,08	0,12	0,70	0,15	0,07
5	0,17	0,17	1,35	0,23	0,09
6	0,26	0,20	1,50	0,42	0,18
7	0,36	0,33	1,48	0,62	0,31
8	0,40	0,55	1,53	0,76	0,66
9	0,37	0,66	1,54	0,84	0,94
10	0,49	0,69	1,54	0,81	1,06
11	0,55	0,77	1,55	0,98	1,31
12	0,56	0,81	1,57	1,04	1,43
13	0,57	0,85	1,64	1,08	1,55
14	0,58	0,93	1,72	1,12	1,70
15	0,59	0,88	1,67	1,16	1,66
16	0,60	0,89	1,68	1,19	1,71
17	0,61	0,90	1,69	1,20	1,72
18	0,62	0,92	1,70	1,24	1,75
19	0,61	0,90	1,69	1,25	1,77
20	0,59	0,89	1,67	1,24	1,75
21	0,62	0,91	1,70	1,26	1,78
22	0,61	0,91	1,69	1,26	1,77
23	0,61	0,90	1,69	1,25	1,77
24	0,60	0,89	1,68	1,24	1,76
25	0,59	0,88	1,67	1,23	1,75
26	0,59	0,89	1,67	1,24	1,75
27	0,60	0,89	1,68	1,24	1,76
28	0,64	0,89	1,68	1,24	1,76

APÊNDICE C

REVESTIMENTOS

Os resultados parciais, a média, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV), obtidos na avaliação do desempenho dos revestimentos de argamassa produzidos, serão apresentados nas tabelas deste Apêndice.

Tabela C 1 - Valores individuais para a Resistência de aderência à tração para os revestimentos produzidos com agregado ANat1 aplicados em base cerâmica com solução de cal.

CP	Resistência de Aderência à tração (MPa)	Forma de Ruptura (%)				
		Substrato	Substrato/ Revestimento	Revestimento	Revestimento/ Cola	Cola/Pastilha
1	0,12	0	100	0	0	0
2	0,25	0	100	0	0	0
3	0,29	0	100	0	0	0
4	0,07	0	100	0	0	0
5	0,10	0	100	0	0	0
6	0,13	0	100	0	0	0
7	0,19	0	100	0	0	0
8	0,08	0	100	0	0	0
9	0,07	0	100	0	0	0
10	0,16	0	100	0	0	0
11	0,09	0	100	0	0	0
12	0,14	0	100	0	0	0
Média	0,14	0	100	0	0	0
DP:	0,07					
CV:	50%					

Tabela C 2 - Valores individuais para a Resistência de aderência à tração para os revestimentos produzidos com agregado ANat3 aplicados em base cerâmica com solução de cal.

CP	Resistência de Aderência à tração (MPa)	Forma de Ruptura (%)				
		Substrato	Substrato/ Revestimento	Revestimento	Revestimento/ Cola	Cola/Pastilha
1	0,16	0	100	0	0	0
2	0,23	0	100	0	0	0
3	0,17	0	100	0	0	0
4	0,17	0	100	0	0	0
5	0,27	0	100	0	0	0
6	0,18	0	100	0	0	0
7	0,18	0	100	0	0	0
8	0,19	0	100	0	0	0
9	0,13	0	100	0	0	0
10	0,21	0	100	0	0	0
11	0,14	0	100	0	0	0
12	0,04	0	100	0	0	0
Média	0,17	0	100	0	0	0
DP:	0,06					
CV:	33%					

Tabela C 3 - Valores individuais para a Resistência de aderência à tração para os revestimentos produzidos com agregado AMis3 aplicados em base cerâmica com solução de cal.

CP	Resistência de Aderência à tração (MPa)	Forma de Ruptura (%)				
		Substrato	Substrato/ Revestimento	Revestimento	Revestimento/ Cola	Cola/Pastilha
1	0,16	0	100	0	0	0
2	0,12	0	100	0	0	0
3	0,21	0	100	0	0	0
4	0,07	0	100	0	0	0
5	0,26	0	100	0	0	0
6	0,17	0	100	0	0	0
7	0,10	0	100	0	0	0
8	0,21	0	100	0	0	0
9	0,16	0	100	0	0	0
10	0,19	0	100	0	0	0
11	0,17	0	100	0	0	0
12	0,18	0	100	0	0	0
Média	0,17	0	100	0	0	0
DP:	0,05					
CV:	31%					

Tabela C 4 - Valores individuais para a Resistência de aderência à tração para os revestimentos produzidos com agregado AMis3 aplicados em base cerâmica com chapisco.

CP	Resistência de Aderência à tração (MPa)	Forma de Ruptura (%)						
		Substrato	Substrato/ Chapisco	Chapisco	Chapisco/ Revestimento	Revestimento	Revestimento/ Cola	Cola/Pastilha
1	0,12	0	0	0	0	100	0	0
2	0,20	0	0	0	0	95	5	0
3	0,11	0	25	10	60	5	0	0
4	0,23	0	0	0	0	100	0	0
5	0,25	0	90	5	5	0	0	0
6	0,10	0	5	5	10	80	0	0
7	0,10	0	98	0	2	0	0	0
8	0,25	0	0	0	50	50	0	0
9	0,21	0	0	0	0	95	5	0
10	0,22	0	0	0	0	100	0	0
11	0,31	0	50	0	10	40	0	0
12	0,13	0	0	0	0	100	0	0
Média	0,19	0,0	22,3	1,7	11,4	63,8	0,8	0,0
DP:	0,07							
CV:	38%							

Tabela C 5 - Valores individuais para a Resistência de aderência à tração para os revestimentos produzidos com agregado ACim3 aplicados em base cerâmica com solução de cal.

CP	Resistência de Aderência à tração (MPa)	Forma de Ruptura (%)				
		Substrato	Substrato/ Revestimento	Revestimento	Revestimento/ Cola	Cola/Pastilha
1	0,10	0	100	0	0	0
2	0,07	0	100	0	0	0
3	0,08	0	100	0	0	0
4	0,09	0	100	0	0	0
5	0,15	0	100	0	0	0
6	0,07	0	100	0	0	0
7	0,14	0	100	0	0	0
8	0,08	0	100	0	0	0
9	0,05	0	100	0	0	0
10	0,08	0	100	0	0	0
11	0,10	0	100	0	0	0
12	0,09	0	100	0	0	0
Média	0,09	0	100	0	0	0
DP:	0,03					
CV:	31%					

Tabela C 6 - Resultado de Absorção de água pelo método do cachimboml em função do tempo).

Tempo (min): Agregado	CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
		ANat1	1	1,2	1,8	2,5	2,9	3,4	3,9	4,0	-	-	-	-	-	-	-
2	0,5		0,9	1,3	1,7	2,1	2,3	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,0	-	-	-	-
3	0,9		1,6	1,7	2,1	2,6	3,0	3,4	3,9	4,0	-	-	-	-	-	-	-
4	0,9		1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,4	3,8	4,0	-	-	-	-	-	-	-
Média	0,9		1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,4	3,6	3,8	3,6	3,9	4,0	-	-	-	-
DP	0,3		0,4	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	-	-	-	-	-	-
CV	33%		27%	27%	22%	20%	21%	16%	14%	11%	-	-	-	-	-	-	-
ANat3	1	0,7	1,0	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	3,0	3,2	3,4	3,5
	2	0,8	1,1	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1	2,4	2,6	2,8	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9
	3	0,6	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	2,7	2,9	3,0
	Média	0,7	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	3,0	3,1	3,3	3,5
	DP	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	CV	14%	10%	17%	11%	10%	9%	11%	12%	13%	14%	12%	13%	12%	13%	12%	13%
AMis1	1	0,6	1,0	1,3	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	-
	2	0,8	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6	2,9	3,1	3,4	3,6	3,9	4,0	-	-	-	-
	3	0,8	1,2	1,6	1,9	2,2	2,5	2,7	3,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,0	-	-	-
	4	0,7	1,1	1,3	1,6	1,8	2,0	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,6	3,8	4,0
	Média	0,7	1,2	1,5	1,8	2,0	2,3	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5	3,7	3,7	3,7	3,9	4,0
	DP	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,1	0,1	-
	CV	13%	11%	12%	10%	13%	13%	12%	12%	12%	11%	11%	10%	7%	4%	4%	-
AMis3	1	0,8	1,2	1,5	1,9	2,2	2,5	2,7	2,9	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	-	-	-
	2	0,8	1,2	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	-	-
	3	0,7	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
	Média	0,8	1,2	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5	2,7	3,0	3,2	3,3	3,5	3,7	3,8	3,8	4,0
	DP	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-
	CV	8%	5%	10%	9%	10%	9%	8%	8%	8%	8%	9%	9%	8%	7%	-	-
ACim3	1	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7	1,8	2,1	2,3	2,5	2,6	2,8	3,0	3,2	3,3	3,5	3,6
	2	0,8	1,1	1,4	1,7	1,9	2,2	2,4	2,6	2,9	3,1	3,3	3,4	3,7	3,9	4,0	-
	3	0,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,0
	Média	0,8	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,5	3,6	3,8	3,8
	DP	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
	CV	13%	5%	4%	6%	6%	10%	7%	6%	7%	9%	9%	6%	7%	8%	7%	7%