



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica

**ESTUDO DO USO DE RESÍDUO CERÂMICO DE OBRAS COMO AGREGADO  
MIÚDO PARA A FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS PARA REVESTIMENTO DE  
ALVENARIAS**

Suelen de Oliveira Paixão

Projeto de Graduação apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Escola  
Politécnica, Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do título de  
Engenheiro.

Orientador: Jorge dos Santos

Rio de Janeiro

Abril de 2013

**ESTUDO DO USO DE RESÍDUO CERÂMICO DE OBRAS COMO AGREGADO  
MIÚDO PARA A FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS PARA REVESTIMENTO DE  
ALVENARIAS**

Suelen de Oliveira Paixão

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Jorge dos Santos

---

Profa. Ana Catarina Jorge Evangelista

---

Profa. Elaine Garrido Vazquez

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2013

Paixão, Suelen de Oliveira

Estudo do uso de resíduo cerâmico de obras como agregado miúdo para a fabricação de argamassas para revestimento de alvenarias/ Suelen de Oliveira Paixão. – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2013.

XVIII, 56 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Jorge dos Santos

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 50-56

1. Resíduo Cerâmico 2. Construção. 3. Demolição. 4. Agregado. 5. Argamassa. I. Santos, Jorge dos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Estudo do uso de resíduo cerâmico de obras como agregado miúdo para a fabricação de argamassas para revestimento de alvenarias.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha avó, Almeirinda Estorque, por todo carinho e preocupação.

Ao meu avô, Aristides de Oliveria, pelo amor e dedicação, que nem mesmo a ausência nestes últimos anos da graduação me fez deixar de sentir.

Aos meus pais, Marcos Luiz Paixão e Lenir Storque Paixão, pelo amor incondicional e pelos sacrifícios que fizeram para que eu chegasse até aqui.

Ao meu namorado Diego Daflon, pelo companheirismo, paciência, amizade e por sempre me fazer acreditar no meu potencial.

Aos amigos do plano espiritual pela proteção e por toda luz emanada nos momentos de escuridão.

## AGRADECIMENTOS

Nossas conquistas se devem não somente ao nosso esforço pessoal, são também alcançadas pela colaboração de muitas outras pessoas. A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio de professores e amigos que tive o privilégio de conviver. Portanto, não seria possível encerrar este trabalho sem antes agradecer a algumas destas pessoas tão especiais.

Ao Professor Jorge dos Santos, pela orientação, pela disponibilidade apresentada a todo o momento, pelo incentivo, pelo qual com dedicação e eficiência transmitiu seus conhecimentos e experiência.

À Professora Ana Catarina Jorge Evangelista por todo o apoio dispensado no desenvolvimento deste trabalho. Obrigada pela amizade e por acreditar no meu potencial.

À Professora Elaine Garrido Vazquez, pela amizade, incentivo e por todo o conhecimento transmitido ao longo do curso, sempre pronta a ajudar no que fosse possível.

Ao professor Wilson Wanderley da Silva, pela viabilização dos ensaios realizados.

Aos Professores Carlos Magluta, Ney Roitman e Paula Viero, pelos ensinamentos e pelo incentivo à pesquisa.

Às minhas grandes amigas Mariana Miranda, Simone Zappe, Vanessa Silva e Vivian Quito, que a graduação me deu a oportunidade de conhecer. Foram vários anos juntas, quase uma vida. Obrigada por todo o carinho e companheirismo ao longo destes anos.

Aos meus grandes amigos Luiz Augusto Berger e Raphael Duarte, pelo convívio, pelo apoio e pela amizade sincera.

Aos amigos Mayara Amario e Thiago Sessa, pela ajuda durante os momentos de dúvida desta pesquisa.

Às amigas do Labest, Flávia Carolina Leite Borges e Cássia Silva Monteiro, pela amizade e carinho. Obrigada pelos conselhos e por estarem sempre ao meu lado tanto nos momentos de angústia quanto nos momentos de alegria que vivi durante a graduação.

À HOLCIM Brasil S/A, pela disponibilização de seu laboratório de ensaios e pela doação de alguns dos materiais necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos da HOLCIM Brasil S/A: Jackson William, Regis Moura, Edson Nascimento, pelas horas de trabalho dispensadas à pesquisa. Sem o profissionalismo e a boa vontade de cada um de vocês a realização deste estudo não seria possível.

Ao amigo Renan Santiago do Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFRJ, pela dedicação e por toda ajuda durante a realização de alguns dos ensaios mecânicos deste trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta pesquisa.

À Deus, por me dar coragem para prosseguir, por me consolar nos momentos de aflição e por sempre vigiar os meus passos. A Ti, meu Deus, dedico esta vitória.

*“A ambição universal dos homens é viver colhendo o que nunca plantaram”*

Adam Smith.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Estudo do uso de resíduo cerâmico de obras como agregado miúdo para a fabricação de argamassas para revestimento de alvenarias

Suelen de Oliveira Paixão

Abril/2013

Orientador: Jorge dos Santos

Curso: Engenharia Civil

A construção civil é um dos setores que provoca maior impacto ambiental devido ao grande consumo de matéria-prima. Os agregados utilizados na construção civil são os insumos minerais mais consumidos atualmente. Neste contexto, a reciclagem dos resíduos de construção e demolição tem se mostrado uma alternativa na redução dos impactos gerados. Assim, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar a viabilidade técnica da utilização do resíduo cerâmico proveniente da construção civil como material alternativo para a produção de argamassa de revestimento de alvenarias. O estudo apresenta resultados da caracterização granulométrica e física dos agregados miúdos reciclados obtidos a partir do beneficiamento de resíduos de construção e demolição, coletados em uma obra de reforma do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Para a produção das argamassas foram considerados cinco níveis diferentes de substituição do agregado natural pelo agregado miúdo reciclado. A influência do agregado reciclado foi avaliada sobre as propriedades da argamassa no estado fresco (índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (densidade de massa aparente, resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral). Os resultados mostraram a viabilidade no uso do agregado miúdo reciclado para a produção de argamassa de revestimento de alvenarias.

*Palavras-chave:* Construção, Demolição, Resíduo Cerâmico, Agregado, Argamassa.



Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Study of the use of ceramic construction and demolition waste as fine aggregate for making mortars for masonry coating

Suelen de Oliveira Paixão

April/2013

Advisor: Jorge dos Santos

Course: Civil Engineering

The civil construction is one of the sectors that has provoked high ambient impact, due to the raised raw material consumption. The aggregates used in construction are the most consumed mineral inputs today. In this context, the recycling of construction and demolition waste appears as a way to minimize those impacts. So, this work was developed with the objective of analyzing the feasibility of using ceramic waste from the construction industry as an alternative material for the production of mortar for masonry coating. The study presents the results of particle size and physical characterization of the recycled fine aggregates obtained from the processing of construction and demolition waste collected from a reconstruction done at the Building Materials Laboratory of the Federal University of Rio de Janeiro. For the production of mortars were considered five levels of substitution of natural fine aggregates by recycled fine aggregates. The recycled aggregate influence was evaluated in fresh mortar properties (consistence index, specific gravity and air entrained content) and in hardened mortar properties (specific gravity, compressive strength and tensile strength by diametrical compression). The results showed the feasibility of using recycled aggregate in the production of mortar for masonry coating.

*Keywords:* Construction, Demolition, Ceramic waste, Aggregate, Mortar.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. JUSTIFICATIVAS .....	2
1.2.1. Ambiental .....	2
1.2.2. Econômica .....	3
1.2.3. Tecnológica .....	3
1.3. OBJETIVOS .....	4
1.4. METODOLOGIA .....	4
1.5. ESTRUTURA DA MONOGRAFIA .....	5
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO .....	6
2.1.1. Composição e geração .....	6
2.1.2. Revisão da legislação.....	8
2.2. ARGAMASSAS UTILIZADAS NO REVESTIMENTO DE ALVENARIAS ....	11
2.2.1. Classificação das argamassas .....	11
2.2.2. Funções do revestimento de argamassa.....	13
2.2.3. Propriedades das argamassas.....	16
2.2.4. Principais constituintes da argamassa .....	21
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>25</b>
3.1. DESCRIÇÃO.....	25
3.2. DEFINIÇÃO DAS MISTURAS.....	25
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	26
3.3.1. Cimento .....	26
3.3.2. Agregado miúdo natural .....	27
3.3.3. Agregado miúdo reciclado.....	29
3.3.4. Água .....	34
3.4. ENSAIOS REALIZADOS .....	34
3.4.1. Argamassa no Estado Fresco.....	34
3.4.2. Argamassa no Estado Endurecido .....	35

3.5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	37
3.5.1.	Caracterização das argamassas no estado fresco .....	37
3.5.2.	Caracterização das argamassas no estado endurecido .....	40
<b>4.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>47</b>
4.1.	CONCLUSÕES .....	47
4.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	48
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - Balanço do Consumo-Produção de Agregados para Construção Civil. Fonte: ANEPAC – DNPM/DIRIN. ....	1
<b>FIGURA 2</b> - Total de RCD coletados por regiões e Brasil. Fontes: Pesquisas ABRALPE, 2010 e 2011. ....	6
<b>FIGURA 3</b> - Composição do resíduo de construção civil no Brasil. Fonte: Desenvolvido pela autora, com base no estudo de LUCENA (2005). ....	10
<b>FIGURA 4</b> - Diagrama dos ensaios no estado fresco e endurecido. ....	26
<b>FIGURA 5</b> - Limites inferior e superior para a zona utilizável conforme estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2005). Fonte: HOLCIM S/A. ....	28
<b>FIGURA 6</b> - Resíduo cerâmico após britagem na queixada.....	30
<b>FIGURA 7</b> - Limites inferior e superior para a zona utilizável conforme estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2005). Fonte: Desenvolvido pela autora. ....	31
<b>FIGURA 8</b> - Ensaio para a determinação do índice de consistência – Realizado no laboratório HOLCIM S/A.....	34
<b>FIGURA 9</b> - Ensaio para a determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado – Realizado no laboratório HOLCIM S/A.....	35
<b>FIGURA 10</b> - Prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão – Realizado no laboratório HOLCIM S/A.....	36
<b>FIGURA 11</b> - Prensa utilizada nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral – Realizado no laboratório de estruturas LABEST - LEM, UFRJ.....	36
<b>FIGURA 12</b> – Ensaio para a determinação do índice de consistência da mistura M5 com teor de substituição de 100%: a) preparação do ensaio; b) enchimento do molde tronco-cônico; c) coleta dos resultados.....	37
<b>FIGURA 13</b> - Ensaio de resistência à compressão: a) mistura M1; b) mistura M2; c) mistura M3; d) mistura M4; e) mistura M5.....	41
<b>FIGURA 14</b> - Resistência à compressão da argamassa em função do tempo. Fonte: Desenvolvido pela autora. ....	43
<b>FIGURA 15</b> - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral: a) rompimento aos 3 dias; b) rompimento aos 7 dias; c) rompimento aos 28 dias. ....	44

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> - Porcentagens de agregados miúdos a cada mistura. ....	25
<b>TABELA 2</b> - Características físicas e químicas do cimento Portland CP V ARI RS. Fonte: HOLCIM S/A. ....	27
<b>TABELA 3</b> - Distribuição granulométrica da areia natural conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Fonte: HOLCIM S/A. ....	28
<b>TABELA 4</b> - Caracterização física da areia natural. Fonte: HOLCIM S/A. ....	29
<b>TABELA 5</b> - Distribuição granulométrica do agregado miúdo cerâmico, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Fonte: Desenvolvido pela autora. ....	30
<b>TABELA 6</b> - Caracterização física do agregado miúdo cerâmico. Fonte: Desenvolvido pela autora. ....	31
<b>TABELA 7</b> - Resultados do ensaio de determinação do índice de consistência, conforme NBR 13276/2002. Fonte: Desenvolvido pela autora. ....	38
<b>TABELA 8</b> - Resultados do ensaio de densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado, conforme NBR 13278/1995. Fonte: Desenvolvido pela autora. ....	39
<b>TABELA 9</b> - Resultados do ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido, conforme NBR 13280/95. Fonte: Desenvolvido pela autora. ....	40
<b>TABELA 10</b> - Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado em corpos de prova 50 mm x 100 mm para cada mistura de argamassa, conforme NBR 5739/07. Fonte: Desenvolvido pela autora. ....	42
<b>TABELA 11</b> - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado em corpos de prova 50 mm x 100 mm conforme NBR 7222/11. Fonte: Desenvolvido pela autora. ....	45
<b>TABELA 12</b> - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão das argamassas. ....	46

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 1</b> – Classificação dos resíduos de construção civil. Fonte: Adaptado da Resolução nº 307/2002 do CONAMA. ....	8
--	---

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

**A/C** - RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO

**ABNT** - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

**ABRELPE** - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS

**ACUMUL.** - ACUMULADO

**AGN** - AGREGADO NATURAL

**AGR** - AGREGADO RECICLADO

**ANEPAC** - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

**ARC** - AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

**ARI** - ALTA RESISTÊNCIA INICIAL

**ARM** - AGREGADO RECICLADO MISTO

**Art.** - ARTIGO

**Comlurb** - COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA

**CONAMA** - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE

**CP** - CORPO DE PROVA

**CP V ARI** - CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL

**D** - DIÂMETRO

**Det.** - DETERMINAÇÃO

**DIRIN** - DIRETORIA DE INFORMAÇÕES

**DNPM** - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL

**EUA** - ESTADOS UNIDOS DAS AMÉRICAS

**F** - FORÇA

**H** - ALTURA

**IBGE** - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA

**ISO** - INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION

**M** - MISTURA

**M<sub>a</sub>** - MASSA DE ÁGUA

**M<sub>s</sub>** - MASSA DE SÓLIDO

**M<sub>c</sub>** - MASSA DO RECIPIENTE CILÍNDRICO DE PVC CONTENDO A ARGAMASSA DE ENSAIO

**M<sub>v</sub>** - MASSA DO RECIPIENTE CILÍNDRICO DE PVC VAZIO

**MF** - MÓDULO DE FINURA

**NBR** - NORMA BRASILEIRA

**NM** - NORMAS DO MERCOSUL

**PF** - PERDA AO FOGO

**pH** - POTENCIAL HIDROGENIÔNICO

**R** - RESISTÊNCIA

**R.I.** - RESÍDUO INSOLÚVEL

**RCD** - RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

**RSU** - RESÍDUO SÓLIDO URBANO

**UFRJ** - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

**V<sub>r</sub>** - VOLUME DO RECIPIENTE CILÍNDRICO DE PVC



## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

$\approx$  - APROXIMADAMENTE

$^{\circ}\text{C}$  - GRAUS CELSIUS

% - PORCENTAGEM

**g** - GRAMA

**ppm** - PARTE POR MILHÃO

**g/cm<sup>3</sup>** - GRAMA POR CENTÍMETRO CÚBICO

**kg/dm<sup>3</sup>** - QUILOGRAMA POR DECÍMETRO CÚBICO

**kg/m<sup>3</sup>** - QUILOGRAMA POR METRO CÚBICO

**m<sup>2</sup>/kg** - METRO QUADRADO POR QUILOGRAMA

**MPa** - MEGA PASCAL

**N** - NEWTON

$\gamma$  - DENSIDADE DE MASSA

**cm** - CENTÍMETROS

**$\mu\text{m}$**  - MICROMETROS

**mm** - MILÍMETROS

**cm<sup>3</sup>** - CENTÍMETROS CÚBICOS

**min** - MINUTOS

**t** - TONELADAS

**MPa/s** - MEGA PASCAL POR SEGUNDO

**mm/min** - MILÍMETROS POR MINUTO

**C3A** - ALUMINATO TRICÁLCICO

**CO<sub>2</sub>** - DIÓXIDO DE CARBONO

**SiO<sub>2</sub>** - DIÓXIDO DE SILÍCIO

**C<sub>4</sub>AFe** - FERRO-ALUMINATO TETRACÁLCICO

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** - ÓXIDO DE ALUMÍNIO

**CaO** - ÓXIDO DE CÁLCIO

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** - ÓXIDO DE FERRO

**MgO** - ÓXIDO DE MAGNÉSIO

**K<sub>2</sub>O** - ÓXIDO DE POTÁSSIO

**Na<sub>2</sub>O** - ÓXIDO DE SÓDIO

**C<sub>2</sub>S** - SILICATO BICÁLCIO

**C<sub>3</sub>S** - SILICATO TRICÁLCICO

**SO<sub>3</sub>** - TRIÓXIDO DE ENXOFRE

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O grande desenvolvimento tecnológico dos últimos anos aumentou significativamente o volume de recursos minerais explorados no mundo. Os agregados utilizados na construção civil são os insumos minerais mais consumidos atualmente, conforme dados fornecidos pelos Anuários Mineraiis. Em meados da primeira década do século 21, em 16 países europeus registrou-se o consumo médio de 6 a 10 t/habitante/ano. Nos EUA, a taxa foi de 8 t/habitante/ano. No Brasil, em 2009, estimou-se que o consumo estava um pouco acima de 3 t/ habitante/ano (DNPM, 2009). Essa demanda para a construção civil vem crescendo a cada ano, como mostra a Figura 1.

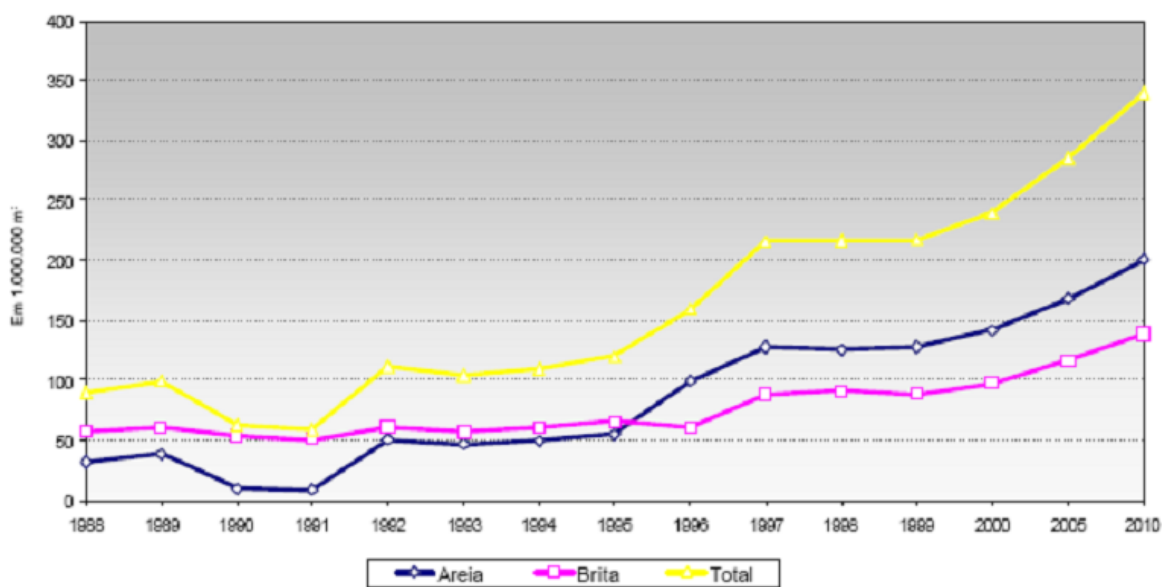


Figura 1 - Balanço do Consumo-Produção de Agregados para Construção Civil. Fonte: ANEPAC – DNPM/DIRIN.

Associado a expansão do consumo de agregados houve um enorme aumento na quantidade de resíduos inorgânicos produzido. Nas grandes cidades brasileiras, as atividades de canteiro de obras são responsáveis por aproximadamente 50% dos resíduos de construção e demolição (PINTO, 1999). Tradicionalmente, esses resíduos são descartados indiscriminadamente no meio ambiente ou depositados em aterros. No entanto, alternativas

de reutilização e reciclagem devem ser pensadas como as primeiras alternativas para o seu gerenciamento, buscando reintroduzi-los no ciclo produtivo.

Embora ainda não exista estatísticas, em média, o entulho que sai dos canteiros de obra no Brasil é composto por cerca de 80% de tijolos, areias e argamassas, 9% de restos de concreto, 6% de pedras, 3% de cerâmica, 2% de gesso e 1% de madeira (LUCENA, 2005). É possível, portanto, triturar mais de 90% dos RCD (argamassa e componentes de vedação) para serem usados como agregado, na produção de componentes de construção e argamassas.

Apesar de estudos sistemáticos no Brasil sobre as técnicas de reciclagem existir desde 1983, a taxa de reciclagem ainda é inferior a 5% de todo o RCD gerado pela indústria da construção civil. A falta de especificações técnicas e do pleno conhecimento do comportamento desses materiais para a obtenção de concretos e argamassas dificulta a utilização dos RCDs em lugar dos agregados naturais (LEITE, 2009).

Neste contexto, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos científicos que possam reduzir as deficiências do conhecimento, estabelecendo as propriedades e o comportamento dos agregados reciclados.

## **1.2. JUSTIFICATIVAS**

### **1.2.1. Ambiental**

A deposição irregular do RCD tem grande importância na qualidade ambiental urbana. Essa prática tem sido relacionada com enchentes, causadas pelo assoreamento de córregos, com prejuízos à paisagem, obstrução de vias de tráfego e com a proliferação de doenças. Além disso, o recolhimento do RCD depositado ilegalmente representa um custo significativo para os municípios. Segundo a Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (Comlurb), o volume de recursos da empresa no ano de 2012 foi 6% maior que o seu orçamento de R\$ 935 milhões em 2011. Somente nos últimos quatro anos, os gastos aumentaram em 48%. De acordo com a presidente da Comlurb, Angela Fonti, o volume de lixo coletado entre 2005 e 2010 aumentou 11,3%, enquanto que a população cresceu apenas 1,29% no período.

### **1.2.2. Econômica**

O resíduo da construção e demolição é composto por fragmentos ou restos de cerâmica, aços, madeiras, gesso, etc. A redução e o aproveitamento desse resíduo podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos, o que implica, muitas vezes, num menor dispêndio econômico. Além disso, o elevado crescimento populacional seguido de um grande déficit habitacional em todo o país acentua a necessidade de se obter materiais de construção de baixo custo e capazes de atender as normas vigentes.

Pera (1996) e Sagoe-Crentsil et all. (1998) relatam que um uso econômico para os agregados reciclados deve incluir a substituição da areia natural pelos finos reciclados, pois a quantidade deste material que é gerada é de aproximadamente 40 a 50 % do total de material reciclado beneficiado.

### **1.2.3. Tecnológica**

A utilização de materiais suplementares residuais da construção civil na produção de materiais cimentícios, além de reduzir o consumo de energia e os impactos ambientais relacionados à destinação final destes, pode proporcionar ganhos nas propriedades mecânicas e durabilidade dos novos materiais. A possibilidade de desenvolvimento de atividade pozolânica por parte do material cerâmico pode substituir uma porcentagem do cimento Portland ou do agregado. Na hidratação da pasta de cimento, são produzidos cristais, com propriedades aglomerantes, e hidróxido de cálcio (cal hidratada), que pode comprometer a estabilidade química do cimento. Este composto é solúvel, sendo motivo de desagregação da argamassa ou do concreto. O material pozolânico, em suma, consome a cal hidratada gerando novos produtos com propriedades aglomerantes. Desta forma, ao eliminar a cal hidratada do material cimentício, a pozolana é de alto interesse, pois se acredita que agregados reciclados com elevados teores desse material em sua composição podem contribuir para a resistência à compressão de argamassas em idades mais avançadas (LIMA, 1999).

### **1.3. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnica da utilização do resíduo cerâmico proveniente da construção civil como material alternativo para a produção de argamassa de revestimento de alvenarias.

O estudo visa ampliar o conhecimento das propriedades e do comportamento das argamassas produzidas com agregados reciclados.

### **1.4. METODOLOGIA**

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas, a primeira englobando as considerações iniciais, as justificativas, os objetivos e a revisão bibliográfica do assunto abordado e a segunda apresentando o programa experimental adotado e os resultados obtidos ao final da pesquisa.

O programa experimental foi elaborado de forma a atingir o objetivo da pesquisa, compreendendo assim, os seguintes estudos:

- Avaliação de algumas propriedades físicas do agregado miúdo produzido a partir do resíduo de construção e demolição, seguida da comparação dos resultados obtidos com as especificações da Norma Brasileira para o agregado natural (por exemplo: granulometria, massa específica, taxa de absorção, materiais pulverulentos, entre outras);
- Avaliação da influência do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado nas propriedades da argamassa no estado fresco (índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado);
- Avaliação da influência do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado nas propriedades da argamassa no estado endurecido (densidade de massa aparente, resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral).

## **1.5. ESTRUTURA DA MONOGRAFIA**

A estrutura deste trabalho é composta por quatro capítulos.

No Capítulo um discutiu-se sobre a importância do tema, as justificativas que levaram a este estudo, a metodologia adotada e seus objetivos.

O Capítulo dois mostra um levantamento sobre a composição e geração dos resíduos de construção e demolição, apresenta a legislação que estabelece diretrizes para a gestão desses resíduos e contextualiza os resíduos cerâmicos e suas aplicações, além de elucidar os tipos de argamassas utilizadas no revestimento de alvenarias, bem como suas funções e principais propriedades.

O Capítulo três apresenta o planejamento experimental, caracteriza o resíduo cerâmico utilizado, bem como os demais materiais necessários para a produção de argamassa, discutindo sobre os principais aspectos relacionados à influência dos materiais constituintes no desempenho das argamassas, descreve os ensaios realizados e analisa e discute os resultados obtidos nos ensaios.

O Capítulo quatro apresenta as conclusões do projeto experimental e, também, sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

#### 2.1.1. Composição e geração

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são constituídos em cerca de 90% por frações de natureza mineral (concretos, argamassas, rochas naturais, solos e cerâmicas), tanto no Brasil como na Europa (CARNEIRO et al., 2000; FERRAZ et al., 2001; EC, 2000). Do ponto de vista químico, a composição estimada do RCD brasileiro, em óxidos, seria majoritariamente sílica, seguido de alumina e óxido de cálcio (ÂNGULO et al., 2001).

Os RCD são um dos responsáveis pelo esgotamento de áreas de aterros em cidades de médio e grande porte, uma vez que eles correspondem a mais de 50% dos resíduos sólidos urbanos. No Brasil, estima-se que é gerado algo em torno de 30 milhões de toneladas de RCD anualmente (ÂNGULO et al., 2001).

As pesquisas realizadas pela ABRELPE em 2011 revelam o comportamento dos municípios brasileiros relativamente aos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Os municípios pesquisados representam 51% da população urbana total do Brasil indicada pelo IBGE em 2011. A Figura 2 mostra que os municípios coletaram mais de 33 milhões de toneladas de RCD em 2011, um aumento de 7,2% em relação a 2010.

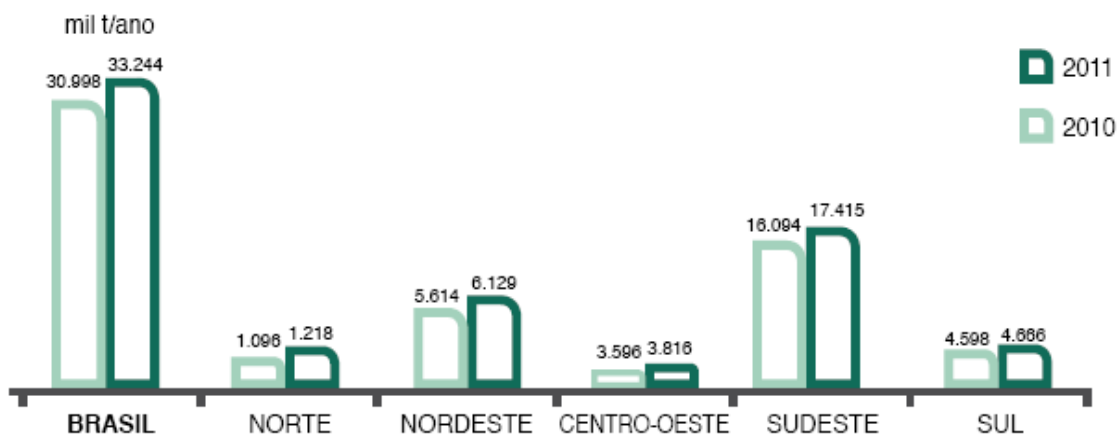


Figura 2 - Total de RCD coletados por regiões e Brasil. Fontes: Pesquisas ABRALPE, 2010 e 2011.



As quantidades apresentadas são expressivas, o que ratifica a situação já evidenciada em anos anteriores, demandando atenção especial dos municípios na gestão desses resíduos, visto que as quantidades reais são ainda maiores já que a responsabilidade para com os RCD é dos respectivos geradores, que nem sempre informam às autoridades os volumes de resíduos sob sua gestão.

O setor da construção civil é um grande consumidor de recursos naturais não-renováveis. Os agregados naturais estão entre os minerais mais consumidos no Brasil e no mundo. A mineração de areia e brita está espalhada por todo o território nacional e é uma das mais importantes atividades extrativas do setor mineral brasileiro, devido ao volume produzido. Em 2010, cerca de 289 e 192 milhões de toneladas de areia e brita, respectivamente, foram produzidas pelo Brasil. Esses valores são comparáveis ao volume de produção do minério de ferro 370 milhões de toneladas, principal produto mineral brasileiro. A participação do macro setor no total do Produto Interno Bruto da economia gira em torno de 20% (CEE/CBIC, 2011).

No Brasil 90% da produção nacional de areia natural têm sido obtida a partir da extração em leito de rios e os 10% restantes, de outras fontes. Paradoxalmente, no Estado de São Paulo, maior produtor brasileiro, a relação é diferente, 45% da areia produzida é proveniente de várzeas, 35% de leitos de rios e o restante, de outras fontes. O estado respondeu, em 2010, por 25,77% da produção nacional, seguido de Minas Gerais (12,06%), Rio de Janeiro (7,71%), Bahia (5,71%), Paraná (5,70%), Rio Grande do Sul (4,99%) e Santa Catarina (4,68%) (DNPM, 2010).

A exploração de areia realizada em rios e outros ambientes de sedimentação causa sérios impactos sobre o meio ambiente, em consequência da retirada da cobertura vegetal nas áreas a serem lavradas, causando assoreamento dos rios e consequentemente a degradação do curso d'água. Por isso, esta atividade extrativa tem sido cada vez mais coibida pelos órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente. Além disso, a exaustão de áreas próximas aos grandes mercados consumidores e a restrição ambiental tem resultado no deslocamento dos mineradores para locais cada vez mais distantes dos grandes centros urbanos, o que onera o preço final da areia natural (FONSECA JÚNIOR, 2012).

Desta forma, a reciclagem de RCD é uma forma de aproximar o setor da sustentabilidade, pela redução dos impactos negativos dos seus resíduos nas cidades e pela geração de matéria-prima que pode ser substituída pela a natural, não-renovável.

### 2.1.2. Revisão da legislação

Considerando a necessidade de implementar diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil, a Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

No Art. 2º desta Resolução, os resíduos da construção civil são todos aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. Os geradores são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem tais resíduos.

No Art. 3º da Resolução nº 307/2002 do CONAMA, os resíduos da construção civil são classificados conforme o exposto no Quadro 1.

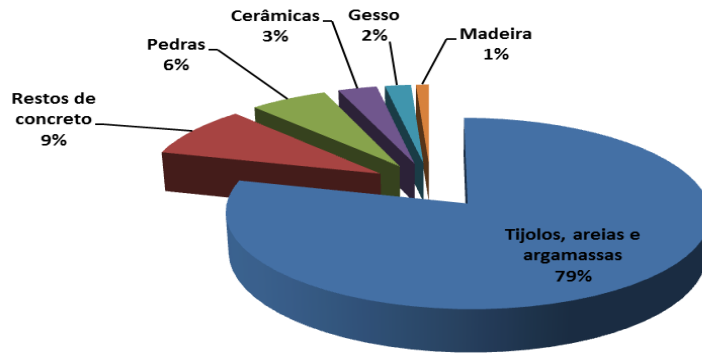
CLASSE	DESCRIÇÃO
A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.
B	Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso.
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

**Quadro 1 – Classificação dos resíduos de construção civil. Fonte: Adaptado da Resolução nº 307/2002 do CONAMA.**

Os resíduos cerâmicos, objeto de análise deste trabalho, pertencem a Classe A da Resolução e, segundo a mesma, podem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

A NBR 15.116 (ABNT, 2004), que dispõe sobre os requisitos para utilização de agregados reciclados de RCD em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural, define *agregado reciclado* como um material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação, infra-estrutura ou outras obras de engenharia. Esta norma ainda classifica os agregados em dois tipos: agregado reciclado de concreto (ARC), cujo teor de fragmentos à base de cimento e rochas é maior que 90%; e agregado reciclado misto (ARM), cujo teor de fragmentos é menor que 90%.

A dificuldade de aplicação está no controle da variabilidade das características físicas ou na presença de impurezas e contaminantes, ou seja, embora a redução na geração de resíduo seja sempre uma ação necessária, ela é limitada, uma vez que existem impurezas na matéria-prima, envolve custos e patamares de desenvolvimento tecnológico (ÂNGULO et al, 2001 apud SOUZA et al, 1999; JOHN, 2000). Mesmo que o agregado atenda os limites definidos pela NBR 15116/2004 e não exista o risco de desempenho, a presença de pequenos pedaços de papel ou madeira pode ser suficiente para que determinada construtora deixe de consumir o agregado reciclado (MIRANDA et al, 2009). No Brasil, Lucena (2005) constatou que os resíduos de construção civil são compostos, principalmente, de tijolos, areias e argamassas (em torno de 80%). Numa menor proporção foram encontrados ainda restos de concreto (9%), pedras (6%), cerâmica (3%), gesso (2%) e madeira (1%). A Figura 3 apresenta a composição do resíduo estudado.



**Figura 3 - Composição do resíduo de construção civil no Brasil. Fonte: Desenvolvido pela autora, com base no estudo de LUCENA (2005).**

A reciclagem de RCD como material de construção civil, iniciada na Europa após a segunda guerra mundial, encontra-se, no Brasil, muito atrasada, apesar da escassez de agregados e área de aterros nas grandes regiões metropolitanas, especialmente se comparada com países europeus, onde a fração reciclada pode atingir cerca de 90% recentemente, como é o caso da Holanda (ZWAN, 1997; DORSTHORST; HENDRIKS, 2000), que já discute a certificação do produto (HENDRICKS, 1994).

Apesar da falta de especificações técnicas para obtenção de concretos e argamassas utilizando o RCD, alguns estudos têm sido desenvolvidos com agregados reciclados para obtenção de argamassas (SILVA et al., 2009; BEKTAS et al, 2009; CORINALDESI; MORICONI, 2009; LIMA et al, 2007; MIRANDA; SELMO, 2006). Segundo Silva (2006), após o resíduo cerâmico ser processado por equipamentos denominados *argamasseiras*, que moem os resíduos de classe A em granulometrias semelhantes as da areia, ele pode ser utilizado como agregado para argamassas de assentamento e revestimento.

Para Moreira (2010) e Ângulo (2000), argamassas que possuem em sua constituição agregados de RCD, apresentam propriedades compatíveis e até superiores às argamassas convencionais. O consumo de cimento se mantém constante ou sofre redução e a resistência à compressão e à tração aumenta provavelmente devido ao desenvolvimento da atividade pozolânica por parte dos resíduos cerâmicos. Também são características de argamassas recicladas, a boa aceitação de plasticidade ao desempenamento e a adesão inicial ao substrato. Diante disso, os autores sugerem que argamassas produzidas com reciclados de RCD tenham potencial para ser incorporadas em vários tipos de construções.

## **2.2. ARGAMASSAS UTILIZADAS NO REVESTIMENTO DE ALVENARIAS**

### **2.2.1. Classificação das argamassas**

A NBR 13529 (ABNT, 1995) define a argamassa para revestimento como sendo “uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”.

A NBR 13530 (ABNT, 1995) descreve a classificação das argamassas segundo vários critérios:

- Quanto à natureza do aglomerante: argamassa aérea e hidráulica;
- Quanto ao número de aglomerantes: argamassa simples e mista;
- Quanto ao tipo de aglomerante: argamassa de cal, de cimento e de cimento e cal;
- Quanto à função do revestimento: argamassa de chapisco, de emboço e de reboco;
- Quanto à forma de preparo ou fornecimento: argamassa dosada em central, preparada em obra, industrializada e mistura semipronta para argamassa;
- Quanto a propriedades especiais: argamassa aditivada, de aderência melhorada, colante, redutora de permeabilidade, de proteção radiológica, hidrófuga e termoisolante.

Usualmente nas obras utilizam-se as argamassas de cal, argamassas de cimento e areia e as argamassas de cimento, cal e areia, mais conhecidas como argamassas mistas.

#### **2.2.1.1 Argamassa de Cal**

Este tipo de argamassa é composta por cal, agregado miúdo e água. A pasta de cal preenche os vazios entre os grãos do agregado miúdo, melhorando a plasticidade e a retenção de água. A argamassa de cal recebe usualmente o nome de argamassa

intermediária, pois quando se utiliza a cal virgem este tipo de argamassa é utilizado para a maturação da cal, para posteriormente ser misturado o cimento.

### **2.2.1.2 Argamassa de Cimento**

A argamassa de cimento Portland é composta, essencialmente, por cimento, agregado miúdo e água. Adquire elevada resistência mecânica em pouco tempo, porém, tem pouca trabalhabilidade e baixa retenção de água. É muito utilizada na confecção de chapisco para ser aplicada nas paredes de alvenaria e estruturas de concreto para aumentar a resistência de aderência do revestimento de argamassas mistas.

### **2.2.1.3 Argamassa Mista**

Este tipo de argamassa utiliza basicamente cimento, cal, agregado miúdo e água. Segundo Sabbatini (1984), os ingleses utilizam a proporção 1 : 3 (aglomerante : areia seca) em volume como traço básico, pois partem do princípio de que com esta proporção os vazios da areia são preenchidos pela pasta aglomerante (cimento e cal). Esta proporção é muito utilizada também no Brasil, como os tradicionais traços em volume 1 : 1 : 6 (cimento : cal : areia) para revestimentos externos e 1 : 2 : 9 para revestimentos internos.

De acordo com Maciel, Barros e Sabbatini (1998) a produção de argamassa significa a mistura ordenada dos seus materiais constituintes, nas proporções estabelecidas e por um determinado período de tempo, utilizando equipamentos específicos para este fim. Quanto à maneira de produção a argamassa pode ser dosada em central, preparada em obra, industrializada ou fornecida em sacos ou silos. Cada um desses tipos de argamassa interfere nas atividades de produção e no seu sequenciamento, na escolha das ferramentas e equipamentos necessários para produção, bem como na adequação do próprio canteiro de obras.

### **2.2.1.4 Argamassa dosada em central**

Argamassa simples ou mista, cujos materiais constituintes são medidos em massa.

### **2.2.1.5 Argamassa preparada em obra**

Argamassa simples ou mista, cujos materiais constituintes são medidos em volume ou massa e misturados na própria obra.

### **2.2.1.6 Argamassa industrializada**

Produto proveniente da dosagem controlada, em instalação própria, de aglomerante(s) de origem mineral, agregado(s) miúdo(s) e, eventualmente, aditivo(s) e adição (ões) em estado seco e homogêneo, ao qual o usuário somente necessita adicionar a quantidade de água requerida.

### **2.2.1.7 Mistura semipronta para argamassa**

Mistura fornecida ensacada ou a granel, cujo preparo é completado em obra, por adição de aglomerante(s), água e, eventualmente, aditivo(s).

## **2.2.2. Funções do revestimento de argamassa**

As funções das argamassas estão associadas diretamente às suas finalidades ou aplicações. As argamassas de assentamento são utilizadas para a elevação de paredes e muros de tijolos ou blocos. Segundo Carasek (2007) as principais funções das juntas de argamassa na alvenaria são:

- Unir as unidades de alvenaria de forma a constituir um elemento monolítico, contribuindo na resistência aos esforços laterais;
- Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos;
- Selar as juntas garantindo a estanqueidade da parede à penetração de água das chuvas;
- Absorver as deformações naturais, como as de origem térmica e as de retração por secagem (origem higroscópica), a que a alvenaria estiver sujeita.

As argamassas de revestimento são utilizadas para revestir paredes, muros e tetos, os quais, geralmente, recebem acabamentos como pintura, revestimentos cerâmicos, laminados, etc.

O revestimento de argamassa pode ser constituído por várias camadas com características e funções específicas. Segundo Sabbatini (1984), as camadas de argamassas de revestimentos recebem as seguintes denominações:

a) Chapisco

O chapisco não é considerado como uma camada de revestimento. É um procedimento de preparação da base, de espessura irregular, sendo necessário ou não, conforme a natureza da base. O chapisco tem por objetivo melhorar as condições de aderência da primeira camada do revestimento ao substrato, em situações críticas basicamente vinculadas a dois fatores:

- Limitações na capacidade de aderência da base: quando a superfície é muito lisa ou com porosidade inadequada, por exemplo, concreto ou substrato com capacidade de sucção incompatível com a aderência do revestimento;
- Revestimento sujeito a ações de maior intensidade: os revestimentos externos em geral e revestimentos de teto.

b) Emboço

O emboço, também conhecido por massa grossa, é uma camada cuja principal função é a regularização da superfície de alvenaria, devendo apresentar espessura média entre 15 mm e 25 mm. É aplicado diretamente sobre a base previamente preparada (com ou sem chapisco) e se destina a receber as camadas posteriores do revestimento (reboco, cerâmica, ou outro revestimento final). Para tanto, deve apresentar porosidade e textura superficiais compatíveis com a capacidade de aderência do acabamento final previsto. Ambas são características determinadas pela granulometria dos materiais e pela técnica de execução.



### c) Reboco

O reboco, ou massa fina, é a camada de acabamento dos revestimentos de argamassa. É aplicada sobre o emboço, e sua espessura é apenas o suficiente para constituir uma película contínua e íntegra sobre o emboço, com no máximo 5 mm de espessura.

É o reboco que confere a textura superficial final aos revestimentos de múltiplas camadas, sendo a pintura, em geral, aplicada diretamente sobre o mesmo. Portanto, não deve apresentar fissuras, principalmente em aplicações externas. Para isto, a argamassa deverá apresentar elevada capacidade de acomodar deformações.

### d) Massa única

A massa única, ou emboço paulista, é o revestimento com acabamento em pintura executado em uma única camada. Neste caso, a argamassa utilizada e a técnica de execução deverão resultar em um revestimento capaz de cumprir as funções tanto do emboço quanto do reboco, ou seja, regularização da base e acabamento.

Carasek (2007) destaca que as principais funções de um revestimento de argamassa de parede são:

- Proteger a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo, no caso dos revestimentos externos;
- Integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com diversas funções, tais como: isolamento térmico ( $\approx 30\%$ ), isolamento acústico ( $\approx 50\%$ ), estanqueidade à água ( $\approx 70$  a  $100\%$ ), segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais;
- Regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo para a estética da edificação.

A seguir, comenta-se sobre algumas propriedades essenciais para que as argamassas possam cumprir as funções citadas anteriormente.

### **2.2.3. Propriedades das argamassas**

#### **2.2.3.1 Consistência**

Segundo Cincotto et al. (1995) é a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a resistir à deformação. Diversos autores classificam as argamassas, segundo a consistência, em secas (a pasta somente preenche os vazios entre os agregados, deixando-os ainda em contato), plásticas (a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos agregados) e fluidas (os agregados ficam imersos na pasta). A consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pelos seguintes fatores: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante.

Para a avaliação da consistência da argamassa é utilizada tradicionalmente no Brasil a mesa de consistência (*flow table*) prescrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996) e são realizados procedimentos de ensaio para determinação do índice de consistência prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 1995). Entretanto, apesar da grande utilização, este é um dos ensaios mais criticados, pois vários são os autores que comentam que a mesa não tem sensibilidade para medir a reologia da argamassa (GOMES et al., 1995; YOSHIDA & BARROS, 1995; CAVANI et al., 1997; PILLEGI, 2001; JOHN, 2003; NAKAKURA, 2003; BAUER et al., 2005; ANTUNES, 2005).

#### **2.2.3.2 Trabalhabilidade**

Esta propriedade relaciona-se principalmente à consistência. Em termos práticos, a trabalhabilidade significa facilidade de manuseio. Pode-se dizer que uma argamassa é trabalhável, de um modo geral, quando ela distribui-se facilmente ao ser assentada, não gruda na ferramenta quando está sendo aplicada, não segrega ao ser transportada, não endurece em contato com superfícies absorptivas e permanece plástica por tempo suficiente para que a operação seja completada (SABBATINI, 1984).

De acordo com Carasek (2007), a trabalhabilidade das argamassas é uma propriedade complexa, resultante da conjunção de diversas outras propriedades, tais como

consistência, plasticidade, retenção de água e de consistência, coesão exudação, densidade da massa e adesão inicial.

Avaliar, quantificar e prescrever valores de trabalhabilidade das argamassas por meio de ensaios é uma tarefa muito difícil, uma vez que ela depende não só das características intrínsecas da argamassa, mas também da habilidade do pedreiro que esta executando o serviço e de várias propriedades do substrato, além da técnica de aplicação (CASCUDO et al., 2005).

Uma proposta mais recente e mais completa que surge no campo de avaliação da trabalhabilidade das argamassas é o método do *Squeeze-Flow*. Essa método baseia-se na medida do esforço necessário para a compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica do material entre duas placas paralelas, sendo tal esforço empreendido normalmente por uma máquina universal de ensaios. O ensaio permite a variação da taxa de cisalhamento e também da magnitude das deformações, sendo, portanto, capaz de detectar pequenas alterações nas características reológicas dos materiais e, ao contrário dos ensaios tradicionais, fornece não apenas um valor medido, mas um perfil do comportamento reológico de acordo com as solicitações impostas (CARDOSO, PILEGGI, JOHN, 2005). O método tem como vantagem possibilitar a simulação de diversas situações reais de aplicação das argamassas, identificando com clareza os parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade). No entanto, como limitação, tem-se a necessidade de um equipamento relativamente caro, além de se restringir ao uso em laboratórios (CARASEK, 2007).

### **2.2.3.3 Coesão**

A coesão, segundo Cincotto et al. (1995), refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa no estado fresco e às ligações químicas da pasta aglomerante.

### **2.2.3.4 Plasticidade**

É a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.

Segundo Cascudo et al. (2005), a plasticidade adequada para cada mistura, de acordo com a finalidade e forma de aplicação da argamassa, demanda uma quantidade ótima de água a qual significa uma consistência ótima, sendo esta função do proporcionamento e natureza dos materiais. Assim, plasticidade e a consistência são as propriedades que efetivamente caracterizam a “trabalhabilidade” e, por isso, algumas vezes elas são confundidas como sinônimos da trabalhabilidade.

#### **2.2.3.5 Retenção de Água**

A retenção de água é a capacidade da argamassa no estado fresco de manter sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água por evaporação, sucção do substrato ou pela hidratação do cimento e carbonatação da cal (CINCOTTO et al, 1995).

Esta propriedade além de interferir no comportamento da argamassa no estado fresco, também afeta as propriedades da argamassa endurecida. Após o endurecimento, as argamassas dependem, em grande parte, de uma adequada retenção de água, para que as reações químicas de endurecimento dos aglomerantes se efetuem de maneira apropriada. Dentre estas propriedades podem ser citadas a aderência, a resistência mecânica final e a durabilidade do material aplicado (CARASEK, 2007).

O método NBR 13277 (ABNT, 2005) permite avaliar a retenção de água da argamassa medindo a massa de água retida pela mesma após a sucção realizada por meio de uma bomba de vácuo a baixa pressão, em um funil de filtragem. A retenção de água é alterada em função da composição da argamassa.

#### **2.2.3.6 Adesão Inicial**

A adesão inicial da argamassa no estado fresco ao substrato é a propriedade que caracterizará o comportamento futuro do conjunto substrato/revestimento quanto ao desempenho decorrente da aderência (CINCOTTO et al., 1995).

Segundo Carasek (2007) ela está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta aglomerante, especificamente a sua tensão superficial. A redução da

tensão superficial da pasta favorece a “molhagem” do substrato, reduzindo o ângulo de contato entre as superfícies e implementação da adesão. Esse fenômeno propicia um maior contato físico da pasta com os grãos de agregado e também com sua base, melhorando, assim, a adesão.

#### **2.2.3.7 Aderência no Estado Endurecido**

Segundo Sabbatini (1984), aderência da argamassa ao substrato pode ser definida como sendo a capacidade que a interface substrato/argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se. Ainda, segundo o autor, não existe uma correspondência biunívoca entre um dado parâmetro e a capacidade de aderência. Por exemplo, aumentando o teor relativo de cimento no aglomerante pode-se aumentar ou diminuir a capacidade de aderência, dependendo das características do substrato.

Carasek (2007) informa que a aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno essencialmente mecânico devido, basicamente, a penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação. Outra parcela menos significativa que contribui para a aderência das argamassas aos substratos são as ligações secundárias do tipo *Van der Waals*. Quando a argamassa no estado plástico entra em contato com a superfície absorvente do substrato, parte da água de amassamento, que contém em dissolução ou estado coloidal os componentes do aglomerante, penetra pelos poros e pelas cavidades do substrato. No interior dos poros ocorrem fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal, e transcorrido algum tempo, esses precipitados intracapilares exercem ação de ancoragem da argamassa à base.

A aderência é significativamente influenciada pelas condições da base, como a porosidade e a absorção de água, a resistência mecânica, a textura superficial e pelas condições de execução do revestimento. A capacidade de aderência da interface argamassa/substrato depende, ainda, da capacidade de retenção de água, da consistência e do teor de ar aprisionado da argamassa. Segundo Silva (2005b), a aderência é influenciada favoravelmente pelo teor de finos do agregado miúdo.

A NBR 15258 (ABNT, 2005), vigente a partir de Outubro de 2005, propõe procedimentos de ensaio para determinação da resistência de aderência à tração. Esta norma introduz o conceito de *aderência potencial*, estabelecendo um substrato-padrão para a aplicação das argamassas de modo a minimizar a influência da base na aderência, buscando assim avaliar apenas a contribuição da argamassa na resistência de aderência à tração (ANTUNES, 2005).

#### **2.2.3.8 Densidade de Massa**

De acordo com Carasek (2007), a densidade de massa das argamassas, também denominada de massa específica, varia com o teor de ar (principalmente se for incorporado por meio de aditivos) e com a massa específica dos materiais constituintes da argamassa, prioritariamente do agregado. Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será a longo prazo, reduzindo esforço em sua aplicação e resultando em maior produtividade.

A densidade de massa das argamassas no estado fresco é determinada pelo método da NBR 13278 (ABNT, 2005) e representa a relação entre a massa e o volume do material.

#### **2.2.3.9 Retração**

A retração ocorre devido à perda rápida e em excesso da água de amassamento e pelas reações químicas de hidratação dos aglomerantes, fatos que provocam as fissuras nos revestimentos. As argamassas ricas em cimento apresentam maiores disponibilidades para o aparecimento de fissuras durante a secagem.

Carasek (2007) afirma que a retração é resultado de um mecanismo complexo, associado com a variação de volume da pasta aglomerante e apresenta papel fundamental no desempenho das argamassas aplicadas, especialmente quanto à estanqueidade e à durabilidade.

## **2.2.4. Principais constituintes da argamassa**

### **2.2.4.1 Cimento**

O engenheiro John Smeaton, por volta de 1756, procurava um aglomerante que endurecesse mesmo em presença de água, de modo a facilitar o trabalho de reconstrução do farol de Edystone, na Inglaterra. Em suas tentativas, verificou que uma mistura calcinada de calcário e argila tornava-se, depois de seca, tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções. Entretanto, foi o pedreiro Joseph Aspdin, em 1824, quem patenteou a descoberta, batizando-a de cimento Portland, numa referência à Portlandstone, tipo de pedra arenosa muito usada em construções na região de Portland, Inglaterra. No pedido de patente constava que o calcário era moído com argila, em meio úmido, até se transformar em pó. A água era evaporada pela exposição ao sol ou por irradiação de calor através de cano com vapor. Os blocos da mistura seca eram calcinados em fornos e depois moídos bem finos (TAYLOR, 1967).

O cimento Portland é o principal responsável pela resistência mecânica das argamassas. Guimarães (2002) diz que o cimento é um ligante hidráulico cuja composição é constituída pelo silicato tricálcico (C3S), silicato bicálcico (C2S) aluminato tricálcico (C3A) e ferro-aluminato tetracálcico (C4AF<sub>e</sub>). Suas propriedades físicas – estabilidade, calor de hidratação, reação álcali-agregado e resistência aos agentes agressivos – são fixadas por normas ou por critérios técnicos de consenso.

O cimento Portland tem ação aglomerante desenvolvida pela reação de seus constituintes com a água, resultando no neo-formados hidratados. Segundo Le Chatelier, a reação fundamental que se apresenta para a “pega” é a transformação do silicato básico de cálcio em silicato hidratado e hidróxido de cálcio. O processo prossegue com uma série de outras reações de dissolução, precipitações dos componentes do cimento, segundo Oliveira, Helio M. (materiais de construção – Vol. 1) apud (GUIMARÃES, 2002).

Em princípio, qualquer cimento pode ser empregado no preparo de argamassa para revestimento (emboços ou revestimentos de camada única), tendo-se apenas atenção com a sua finura. Cimentos muito finos podem produzir maior retração plástica levando à

formação de fissuras com configuração em mapas, as quais permitem a entrada de água, comprometendo a durabilidade dos revestimentos (CARASEK, 2007).

Ainda segundo Carasek (2007) outra manifestação patológica que pode ser atribuída ao cimento, porém de menor incidência, é a formação de eflorescências. Cimentos com elevados teores de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) podem ser responsáveis por eflorescências na argamassa. Durante a hidratação do cimento, esses óxidos, transformam-se em hidróxidos e, em contato com o  $\text{CO}_2$  da atmosfera, transformam-se em carbonatos de sódio e potássio, altamente solúveis em água. A precipitação destes sais na superfície ou em camadas superficiais do revestimento, além de comprometerem o aspecto estético pelo surgimento de manchas, contribuem para a desagregação do revestimento.

Usualmente utilizam-se para confecção de argamassas Cimento Portland CP II Z (com adição de material pozolânico) e o CP II F (com adição de material carbonático – filer) (SILVA, 2006).

#### **2.2.4.2 Agregado miúdo natural**

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), agregados miúdos são “agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150  $\mu\text{m}$ , em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1”.

Geralmente, o agregado empregado para argamassas de revestimento é a areia natural, constituída essencialmente de quartzo e extraída de leitos de rios e “cavas” (CARASEK, 2007).

A distribuição granulométrica da areia influencia diretamente no desempenho da argamassa, interferindo na trabalhabilidade e no consumo de água e aglomerantes, no estado fresco; no revestimento acabado, exerce influência na fissuração, na rugosidade, na permeabilidade e na resistência de aderência (ANGELIM et al., 2003).

Segundo Carneiro et al. (1997), a areia de granulometria muito uniforme, independentemente do formato dos grãos, compromete a trabalhabilidade da argamassa. Há



um conseqüente enrijecimento, impedindo o deslizamento dos grãos da areia entre si, com demanda de um maior consumo de pasta.

Carneiro (1999), ao discutir as resistências mecânicas das argamassas, coloca a distribuição granulométrica da areia e porosidade da argamassa como fatores que influenciam nestas propriedades. Com relação à distribuição granulométrica da areia, quanto maior a continuidade da areia, maiores serão as resistências mecânicas. Este fato ocorre devido à melhoria no empacotamento da mistura, o qual pode ser demonstrado tanto pelo aumento do valor da massa unitária, definida pelo autor como a quantidade de massa capaz de ser acomodada em um recipiente de volume unitário, como pelo aumento do coeficiente de uniformidade da areia. Tal coeficiente de uniformidade traduz uma continuidade na distribuição granulométrica da areia. É definida como sendo a relação entre os diâmetros correspondentes à abertura da malha pela qual passam 60% e 10% em massa de areia.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2005) – *Agregados para concreto – Especificações*, que passou a vigorar a partir de 29/04/2005, criou novos limites de utilização para agregados miúdos. Anteriormente esta norma classificava o agregado miúdo em muito fino (zona 1), fino (zona 2), médio (zona 3) e grosso (zona 4). Agora, conforme o módulo de finura (MF), classifica em zona utilizável inferior (MF varia de 1,55 a 2,20), zona ótima (MF varia de 2,20 a 2,90) e zona utilizável superior (MF varia de 2,90 a 3,50). Nas Figuras 2, 3 e 4 estão apresentados os limites inferior e superior para a zona utilizável inferior, zona ótima e zona utilizável superior, respectivamente.

De acordo com a classificação de Selmo (1989), o agregado miúdo que se encontra na zona utilizável inferior pode ser considerado como areia fina; aquele que se encontra na zona ótima é uma areia média e aquele que se encontra na zona utilizável superior é uma areia grossa.

### **2.2.4.3 Água**

A adição de água à argamassa permite que ocorra as reações químicas dos aglomerantes e sua quantidade influencia na fluidez da argamassa e, conseqüentemente, na trabalhabilidade.

O excesso de água reduz as resistências mecânicas, devido ao aumento dos vazios intergranulares na argamassa, resultando também no aumento da porosidade e da permeabilidade do revestimento, prejudicando sua durabilidade (MATTOS, 2001).

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1. DESCRIÇÃO

O programa experimental desta pesquisa foi desenvolvido de modo a verificar as influências do material reciclado no comportamento das argamassas. Foram estudadas propriedades da argamassa de cimento no estado fresco (índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (densidade de massa aparente, resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral), utilizando diferentes teores de substituição do agregado natural por agregado reciclado de resíduo de construção e demolição.

#### 3.2. DEFINIÇÃO DAS MISTURAS

O traço 1:3 (cimento e areia) foi definido em massa em razão da massa específica do agregado reciclado ser próxima à massa específica do agregado natural, segundo as referências consultadas. A relação água/cimento adotada para a produção das misturas foi igual a 0,55.

Foram utilizados diferentes percentuais de substituição do agregado natural (AGN) pelo agregado reciclado (AGR) variando entre 0% (referência), 20%, 30%, 50% e 100%, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Percentagens de agregados miúdos a cada mistura.**

**Fonte: Elaborada pela autora.**

Mistura	AGN (%)	AGR (%)
M1	100	0
M2	80	20
M3	70	30
M4	50	50
M5	0	100

A Figura 4 mostra o diagrama dos ensaios para as argamassas no estado fresco e endurecido.

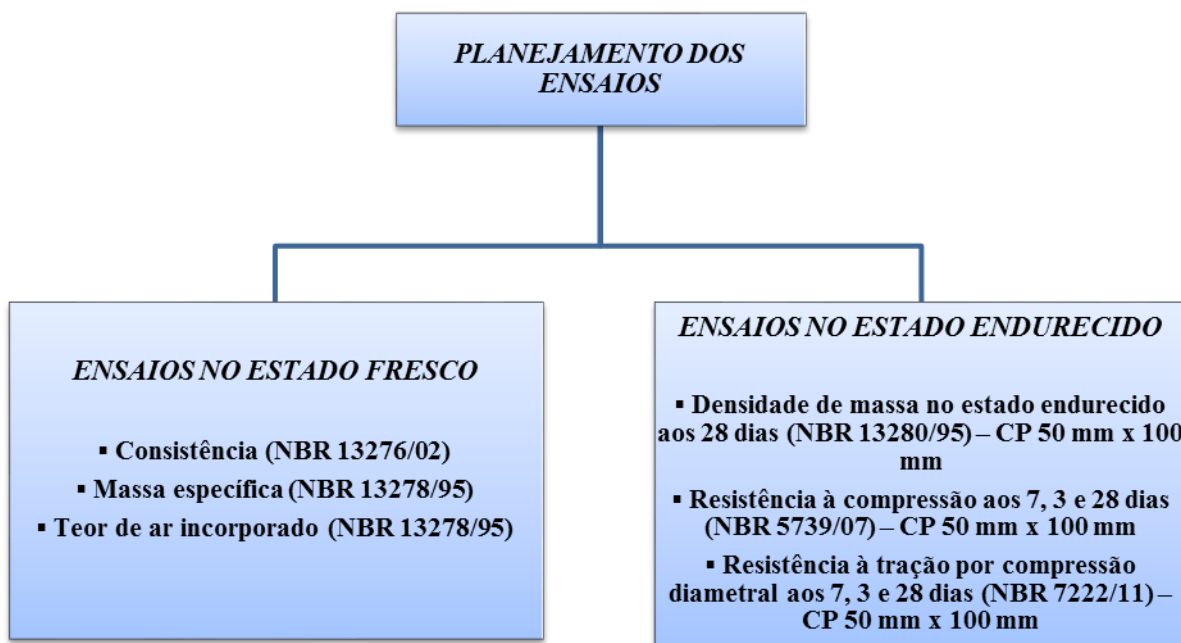


Figura 4 - Diagrama dos ensaios no estado fresco e endurecido.

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.3.1. Cimento

Para a realização do programa experimental foi utilizado o cimento Portland CP V ARI RS, de um mesmo lote, fornecido pela empresa HOLCIM S/A que disponibilizou o seu laboratório de pesquisas, localizado na Rua Saravatá, n° 784, em Marechal Hermes - Rio de Janeiro, para a realização de todos os ensaios pertinentes a esta pesquisa. As características físicas e químicas do cimento são descritas a seguir na Tabela 2.

Tabela 2 - Características físicas e químicas do cimento Portland CP V ARI RS. Fonte: HOLCIM S/A.

ENSAIOS FÍSICOS						
# 200 (%) NBR 11579	Média Desv. Pad. Nº Amostras					≤ 6,0
# 325 (%) NBR 9202	Média Desv. Pad. Nº Amostras					
Blaine (m²/kg) NBR NM 76	Média Desv. Pad. Nº Amostras	4601 102 8	4630 127 8	4761 102 8	4719 99 8	≥ 3000
Início Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras	129 5 8	132 5 8	120 9 8	121 5 8	≥ 60
Fim Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras	186 7 8	189 8 8	176 10 8	177 8 8	≤ 600
Exp. Quente (mm) NBR 11582	Média Desv. Pad. Nº Amostras					≤ 5
R 1 dia (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	18,0 1,72 8	17,7 1,78 8	18,2 0,92 8	19,6 1,05 8	≥ 11,0
R 3 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	33,3 1,08 8	34,4 1,46 8	34,0 1,18 8	35,7 1,10 6	≥ 24,0
R 7 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	43,6 1,75 8	43,3 2,11 8	42,5 1,57 8	44,1 0,68 6	≥ 34,0
R 28 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	54,0 1,09 8	52,4 1,98 8	53,1 1,33 8		
ANÁLISE QUÍMICA (%)						
PF 1000°C SiO <sub>2</sub>	NBR NM 18 NBR 14656	2,16	2,19	2,66	2,50	≤ 4,5
R.I. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR NM 15 NBR 14656	0,82	0,76	0,90	0,87	≤ 1,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 14656					
CaO	NBR 14656					
MgO	NBR 14656					
SO <sub>3</sub>	NBR 14656	2,15	2,07	2,02	1,92	≤ 4,5
CO <sub>2</sub>	NBR NM 20	1,23	1,50	1,88	1,75	≤ 3,0
K <sub>2</sub> O	NBR 14656					
PF 500°C C <sub>3</sub> A (Teórico)	IT Holcim Equação Bogue	0,91	0,90	1,06	0,92	

O CP V ARI não contém adições minerais, permitindo dessa forma uma análise mais realista quanto ao desenvolvimento da atividade pozolânica do material cerâmico presente na mistura de argamassa reciclada.

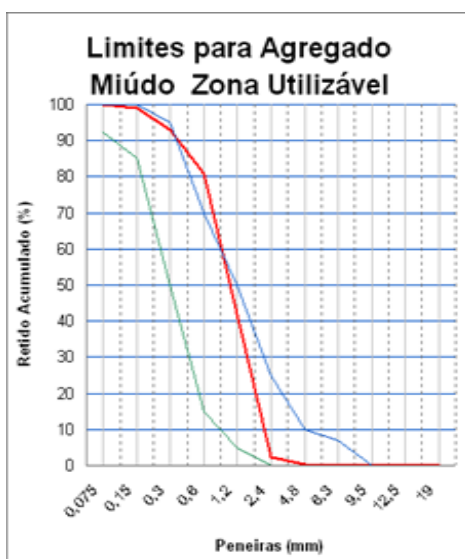
### 3.3.2. Agregado miúdo natural

Como agregado miúdo, foi utilizado areia natural, fornecida pela empresa HOLCIM S/A – fornecedor Minerostre, central KJAC JACAREPAGUÁ - Rio de Janeiro. A Tabela 3 apresenta os resultados da análise granulométrica do agregado.

**Tabela 3 - Distribuição granulométrica da areia natural conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Fonte: HOLCIM S/A.**

Nº	PENEIRAS	PESO		PORCENTAGEM (%)		
	ABERTURA (mm)	RETIDO (g)	(g)	RETIDA	PASSANTE	ACUMUL.
3	76				100.0	
2/1/2	(64)				100.0	
2	(50)				100.0	
1 1/2	38				100.0	
1 1/4	(32)				100.0	
1	(25)				100.0	
3/4	19				100.0	
1/2	(12,5)				100.0	
3/8	9.5				100.0	
1/4	(6,3)				100.0	
4	4.8	2	3	0.3	99.7	0.3
8	2.4	20	24	2.2	97.5	2.5
16	1.2	399	390	39.5	58.1	41.9
30	0.6	372	408	39.0	19.1	80.9
50	0.3	129	110	12.0	7.1	92.9
100	0.15	66	56	6.1	1.0	99.0
200	(0,075)	10	7	0.9	0.2	99.8
<b>FUNDO</b>		2	1	0.2	0.0	100.0
<b>SOMA</b>		1000	999	100		317.5

A Figura 5 mostra que a areia utilizada nos ensaios encontra-se dentro dos limites inferior e superior da zona utilizável superior, o que a classifica como areia grossa.



**Figura 5 - Limites inferior e superior para a zona utilizável conforme estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2005). Fonte: HOLCIM S/A.**

A Tabela 4 apresenta os resultados da caracterização física da areia natural.

**Tabela 4 - Caracterização física da areia natural. Fonte: HOLCIM S/A.**

<b>Ensaio</b>	<b>Resultados</b>	<b>Observações</b>
FORMA [R / S] (HGRS MM)	0,9 / 0,9	
MÓDULO DE FINURA (NBR NM 248)	3.175	GRADUAÇÃO GROSSA [2,90 < MF <= 3,50]
DIMENSÃO MÁXIMA (NBR NM 248)	2.4 mm	AGREGADO MIÚDO
MASSA ESPECÍFICA (NBR NM 52)	2.65 kg/dm <sup>3</sup>	
MASSA UNITÁRIA SÊCA (NBR-7251)	1.62 kg/dm <sup>3</sup>	
MASSA UNITÁRIA ÚMIDA (NBR-7251)	1.30 kg/dm <sup>3</sup>	
UMIDADE DO MATERIAL	3.84%	
MAT. PULVERULENTO (NBR NM 46)	0.35%	OK!! [<= 3%]
IMPUREZAS ORGÂNICAS (NBR NM 49)	< 300 ppm	OK!! SOLUÇÃO OBTIDA MAIS CLARA QUE O PADRÃO
ABSORÇÃO (NBR-9777)	0.70%	OK!! [<1,5%]

### **3.3.3. Agregado miúdo reciclado**

O material britado é proveniente de uma obra de reforma no Laboratório de Materiais de Construção da UFRJ e é constituído apenas por resíduos cerâmicos de construção. O estudo de um material mais homogêneo amplia as possibilidades de aplicação do resíduo por permitir um melhor entendimento das propriedades do material reciclado.

A produção do agregado se deu através de um equipamento destinado a trituração de resíduos Classe A denominado “queixada”. Por se tratar unicamente de pedaços de placas cerâmicas depositados em um ambiente coberto, dispensou-se o processo de secagem da amostra em estufa para a realização do ensaio de granulometria descrito pela NBR NM 248 (2003).



**Figura 6 - Resíduo cerâmico após britagem na queixada.**

Os ensaios de caracterização do agregado reciclado foram feitos no laboratório da empresa HOLCIM S/A por um profissional habilitado, na presença da autora deste trabalho. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos na análise granulométrica do agregado.

**Tabela 5 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo cerâmico, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Fonte: Desenvolvido pela autora.**

Nº	PENEIRAS		PESO		PORCENTAGEM (%)		
	ABERTURA (mm)	RETIDO (g)	RETIDO (g)	RETIDA	PASSANTE	ACUMUL.	
3	76				100.0		
2/1/2	(64)				100.0		
2	(50)				100.0		
1 1/2	38				100.0		
1 1/4	(32)				100.0		
1	(25)				100.0		
3/4	19				100.0		
1/2	(12,5)	29	17	2.3	97.7	2.3	
3/8	9.5	14	12	1.3	96.4	3.6	
1/4	(6,3)	20	28	2.4	94.0	6.0	
4	4.8	19	34	2.7	91.3	8.7	
8	2.4	350	329	34.0	57.3	42.7	
16	1.2	336	207	27.2	30.1	69.9	
30	0.6	129	153	14.1	15.9	84.1	
50	0.3	71	98	8.5	7.5	92.5	
100	0.15	19	50	3.5	4.0	96.0	
200	(0.075)	7	50	2.9	1.2	98.8	
<b>FUNDO</b>		3	20	1.2	0.0	100.0	
<b>SOMA</b>		997	998	100		397.5	



A Figura 7 mostra que o agregado reciclado está fora dos limites inferior e superior da zona utilizável superior.



**Figura 7 - Limites inferior e superior para a zona utilizável conforme estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2005). Fonte: Desenvolvido pela autora.**

A Tabela 6 apresenta os ensaios físicos do material cerâmico triturado.

**Tabela 6 - Caracterização física do agregado miúdo cerâmico. Fonte: Desenvolvido pela autora.**

Ensaio	Resultados	Observações
FORMA [R / S] (HGRS MM)	-	
MÓDULO DE FINURA (NBR NM 248)	3.975	GRADUAÇÃO MUITO GROSSA
DIMENSÃO MÁXIMA (NBR NM 248)	9.5 mm	AGREGADO MIÚDO
MASSA ESPECÍFICA (NBR NM 52)	2.38 kg/dm <sup>3</sup>	
MASSA UNITÁRIA SECA (NBR-7251)	1.25 kg/dm <sup>3</sup>	
MASSA UNITÁRIA ÚMIDA (NBR-7251)	-	
UMIDADE DO MATERIAL	-	
MAT. PULVERULENTO (NBR NM 46)	6.80%	> 3% [ACIMA DO LIMITE]
IMPUREZAS ORGÂNICAS (NBR NM 49)	< 300 ppm	Ok!! SOLUÇÃO OBTIDA MAIS CLARA QUE O PADRÃO
ABSORÇÃO (NBR-9777)	8.90%	> 1,5% [ACIMA DO LIMITE]

Obs.: Os ensaios MASSA UNITÁRIA ÚMIDA e UMIDADE DO MATERIAL não foram realizados para o agregado miúdo reciclado por considerar que o mesmo, ao longo do estudo, estava armazenado em local seco, não sendo necessários os ensaios referentes à umidade do material.

Pela Figura 7 pode-se observar que, por sua distribuição granulométrica, o agregado reciclado ficou fora da zona utilizável proposta pela norma NBR 7211/05 para o agregado convencional. Entretanto, é possível compor a mescla granulométrica forçando as quantidades de materiais retidos, mediante o acréscimo de material de determinado diâmetro máximo. Em função do material disponível no mercado não ser beneficiado mediante composição de mescla granulométrica optou-se por não se utilizar deste recurso no trabalho, porém é importante ressaltar que é possível neutralizar este aspecto de forma a identificar o comportamento em um ou outro caso.

Os valores obtidos na caracterização do agregado miúdo cerâmico, apresentados na Tabela 5, mostram que os agregados reciclados tendem a uma composição granulométrica um pouco mais grossa que os agregados naturais, resultando em um módulo de finura um pouco maior. Segundo Leite (2001) devem ser tomados cuidados com a composição granulométrica dos agregados reciclados na produção de argamassas e concretos para possibilitar misturas trabalháveis, com consistência adequada, que permitam o melhor desempenho técnico.

Os resultados de massa específica e de massa unitária encontrados concordam com a afirmação feita por Leite (2001). Segundo a autora, é consenso que tanto a massa específica, quanto a massa unitária dos agregados reciclados geralmente apresentam valores um pouco menores que os apresentados pelos agregados naturais corretamente utilizados na produção de argamassas e concretos. Barra (1996 apud LEITE, 2001) concluiu em seu estudo com agregados reciclados de concreto e de material cerâmico que quanto mais poroso o material, menor é a massa específica obtida.

O teor de materiais pulverulentos (grãos com tamanho inferior a 0,075 mm) alerta para a possibilidade de ocorrência de retração plástica. Segundo Carasek (2007), esses finos, de alto poder plastificante, devido à sua alta superfície específica e à sua natureza, para uma trabalhabilidade adequada, requerem maior quantidade de água de amassamento, gerando maior retração e fissuração, o que compromete a durabilidade dos revestimentos. Além disso, exigirem mais água, podem interferir no endurecimento da argamassa e levar a uma redução da resistência mecânica do revestimento, devido a alta relação água/aglomerante.

Outra propriedade a avaliar é a capacidade de aderência da argamassa. Altos teores de finos podem prejudicar aderência. Nesse caso, podem ser apresentadas duas hipóteses como explicação. A primeira refere-se ao fato de que, quando da sucção exercida pelo substrato, os s grão muito finos presentes na areia podem penetrar no interior de seus poros, tomando os lugares dos produtos de hidratação do cimento que se formariam na interface e produziram o travamento da argamassa. A segunda hipótese versa sobre a *teoria dos poros ativos do substrato*, segundo a qual um agregado com grãos muito finos produziria uma argamassa com poros de raio médio pequeno; argamassas com poros menores do que os poros do substrato dificultam a sucção da pasta aglomerante, uma vez que o fluxo hidráulico se dá sempre no sentido dos poros maiores para os poros menores. Sendo assim, os poros do substrato seriam, em sua maioria, ineficientes para succionar a pasta aglomerante da argamassa, reduzindo as chances de produzir boa aderência. Angelim (2000) estudou o efeito de diversos teores de finos de diferentes naturezas na composição da argamassa de revestimento, entre eles os silicosos, substituindo parte da areia por agregado com elevado teor de finos inertes. Ele confirmou as hipóteses anteriores, verificando uma redução da resistência de aderência à medida que aumentou o teor total de finos das argamassas (CARASEK, 2007).

A absorção de água é outra característica importante a ser analisada para a utilização de agregados reciclados em argamassas e concretos. Barra (1996 apud LEITE, 2001) relata que, para agregados convencionais, a taxa de absorção de água não exerce quase nenhum tipo de influência nas misturas de concreto, pois os agregados apresentam pouca, ou nenhuma, porosidade ao contrário da utilização de agregados reciclados para produção de concreto que apresentam valores bem mais altos de absorção que os agregados naturais. A quantidade de água que o material reciclado pode absorver está sujeita à fatores como a condição inicial de umidade do agregado, o tempo de permanência de contato do material com a água, se o agregado entra em contato primeiro somente com a água, ou com a pasta de cimento, entre outros. Ao fazer uma análise simplista sobre o assunto, Leite (2001) diz que, quando se produz concretos com agregados reciclados, existe a necessidade de acrescentar mais água à mistura, comparando com um mesmo traço feito com agregado natural. A depender da quantidade de água a mais a ser incorporada na mistura, existirá um aumento da relação a/c e conseqüente redução da resistência mecânica. Assim, para manter

a resistência haverá a necessidade do aumento do consumo de cimento, o que aumenta o custo do concreto produzido. Compensar apenas parcialmente a taxa de absorção dos agregados reciclados é uma boa alternativa para minimizar os problemas com a trabalhabilidade das misturas e ao mesmo tempo para que não haja excesso de água no concreto com conseqüente redução da resistência mecânica.

### **3.3.4. Água**

A água utilizada na produção das argamassas foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro. O pH medido em cinco amostras distintas durante o período experimental apresentou valores entre 6,5 e 6,7.

## **3.4. ENSAIOS REALIZADOS**

### **3.4.1. Argamassa no Estado Fresco**

#### **3.4.1.1 Determinação do índice de consistência**

O índice de consistência foi determinado utilizando os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2002) com utilização da mesa de consistência descrita pela norma NBR 7215 (ABNT, 1996), conforme mostra a Figura 8. A norma não especifica o índice de consistência-padrão. Portanto, foi adotado o índice de consistência de 270 mm  $\pm$  10 mm para garantir a adequada aplicação da mistura.



**Figura 8 - Ensaio para a determinação do índice de consistência – Realizado no laboratório HOLCIM S/A.**

### **3.4.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado**

O ensaio de teor de ar aprisionado foi determinado a partir da densidade de massa da argamassa, conforme procedimentos da norma NBR 13278 (ABNT, 1995). O cálculo do teor de ar incorporado também considera a densidade teórica da argamassa, que para este estudo, foi definida como argamassa do tipo dosada e preparada em obra. A Figura 9 mostra a execução do ensaio.



**Figura 9 - Ensaio para a determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado – Realizado no laboratório HOLCIM S/A.**

## **3.4.2. Argamassa no Estado Endurecido**

### **3.4.2.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido**

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido foi realizado na idade de 28 dias em 4 corpos de prova 50 mm x 100 mm, para cada argamassa, conforme procedimentos descritos na norma NBR 13280 (ABNT, 1995).

### **3.4.2.2 Resistência à compressão**

A resistência à compressão foi determinada nas idades de 3, 7 e 28 dias, com 4 corpos de prova 50 mm x 100 mm para cada idade, em conformidade com a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando uma prensa EMIC DL10000 com velocidade de carregamento de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s, mantida constante durante todo o ensaio. Antes do ensaio, os corpos de prova foram capeados com enxofre, para que houvesse uma

regularização das superfícies de aplicação da carga. A Figura 10 mostra a execução do ensaio e a prensa utilizada.



**Figura 10 - Prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão – Realizado no laboratório HOLCIM S/A.**

### **3.4.2.3 Resistência à tração por compressão diametral**

A resistência à tração por compressão foi determinada nas idades de 3, 7 e 28 dias, com 4 corpos de prova 50 mm x 100 mm para cada idade, em conformidade com a norma NBR 7222 (ABNT, 2011), utilizando uma prensa Shimadzu com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min, mantida constante durante todo o ensaio. A Figura 11 mostra a execução do ensaio e a prensa utilizada.



**Figura 11 - Prensa utilizada nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral – Realizado no laboratório de estruturas LABEST - LEM, UFRJ.**

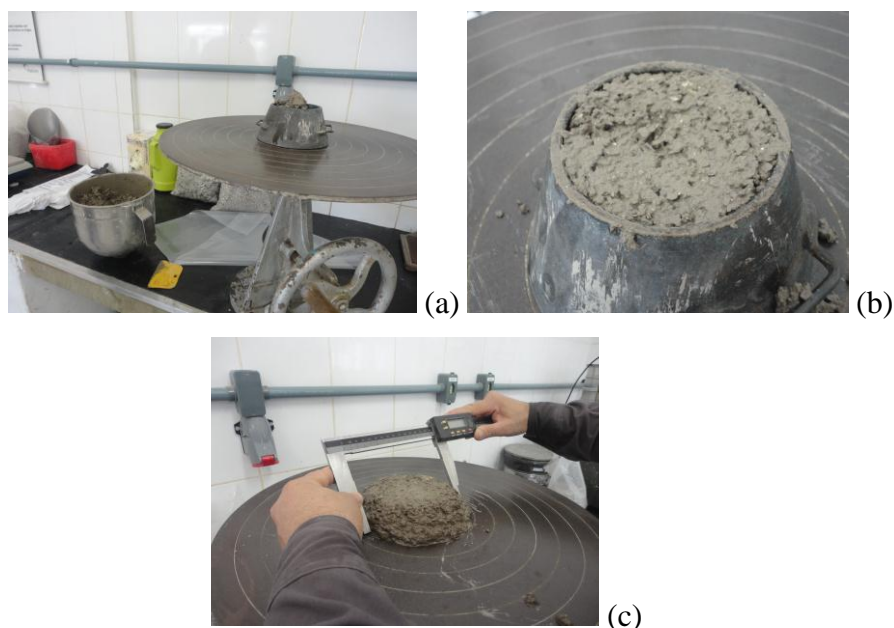
### 3.5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.5.1. Caracterização das argamassas no estado fresco

Com as argamassas preparadas, ainda no estado fresco foram realizados os ensaios de determinação da consistência conforme a NBR 13276 (ABNT, 2002) e os ensaios de determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado conforme a NBR 13278 (ABNT, 1995).

##### 3.5.1.1 Determinação do índice de consistência

Após o preparo da argamassa fresca conforme o proporcionamento definido no item 4.2, determinou-se o índice de consistência utilizando os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2002). Como a norma não especifica o índice de consistência-padrão, foi adotado, para o programa experimental, o índice de consistência de  $270 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$  para garantir a adequada aplicação da mistura. As Figuras 12a, 12b e 12c mostram a sequência de execução do ensaio para a determinação do índice de consistência da mistura M5, na qual há substituição de 100% do agregado natural pelo agregado reciclado.



**Figura 12 – Ensaio para a determinação do índice de consistência da mistura M5 com teor de substituição de 100%: a) preparação do ensaio; b) enchimento do molde tronco-cônico; c) coleta dos resultados.**

A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio para cada mistura de argamassa produzida, bem como a média de suas determinações.

**Tabela 7 - Resultados do ensaio de determinação do índice de consistência, conforme NBR 13276/2002.**  
**Fonte: Desenvolvido pela autora.**

---

<b>ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA PADRÃO (NBR 13276)</b>	
Mistura	Espalhamento Médio (mm)
M1 (100% AGN; 0% AGR)	280
M2 (80% AGN; 20% AGR)	258
M3 (70% AGN; 30% AGR)	253
M4 (50% AGN; 50% AGR)	243
M5 (0% AGN; 100% AGR)	162

---

A partir da análise dos resultados é possível concluir que quanto maior o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, menor o espalhamento. O agregado reciclado retém maior quantidade de água que o agregado natural devido à sua elevada taxa de absorção, o que tende a diminuir a quantidade de água livre nas misturas, contribuindo para a redução do espalhamento. Além disso, o alto teor de finos na composição do agregado miúdo reciclado contribui para o efeito empacotamento, o que leva a uma argamassa mais coesa, com menor tendência à segregação entre o agregado e a pasta.

É importante salientar que a taxa de absorção do material reciclado não foi compensada, o que contribuiu para a diminuição do espalhamento das argamassas produzidas com o agregado miúdo reciclado.

### **3.5.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado**

A massa específica diz respeito à relação entre a massa da argamassa e o seu volume. Segundo Maciel, Barros e Sabbatini (1998), a determinação da massa específica é imprescindível na dosagem das argamassas, para a conversão do traço em massa para traço em volume, que são comumente empregados na produção das argamassas em obra.



A Tabela 8 apresenta os valores de massa específica e teor de ar incorporado obtidos para cada mistura, conforme procedimentos da norma NBR 13278 (ABNT, 1995).

**Tabela 8 - Resultados do ensaio de densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado, conforme NBR 13278/1995. Fonte: Desenvolvido pela autora.**

---

<b>DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR INCORPORADO (NBR 13278)</b>		
Mistura	Densidade de massa (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)
M1 (100% AGN; 0% AGR)	2,17	3,98
M2 (80% AGN; 20% AGR)	2,15	4,02
M3 (70% AGN; 30% AGR)	2,13	4,05
M4 (50% AGN; 50% AGR)	2,11	4,09
M5 (0% AGN; 100% AGR)	2,04	4,22

---

Pela Tabela 8 pode-se observar que, quanto maior o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, menor é a massa específica da argamassa. Segundo Leite (2001) a maior porosidade intrínseca ao agregado reciclado é uma das maiores causas para que ocorra esta redução. Outro fator que contribui para a redução da massa específica da argamassa é que a massa específica do agregado miúdo reciclado é menor que a massa específica do agregado natural, como visto nos itens 4.3.2 e 4.3.3.

A Tabela 8 também mostra que o teor de ar incorporado está diretamente associado à massa específica da argamassa. À medida que a massa específica diminui, a quantidade de ar existente na argamassa aumenta. Essas duas propriedades interferem na trabalhabilidade da argamassa. Segundo Maciel, Barros e Sabbatini (1998), uma argamassa com menor massa específica e maior teor de ar incorporado, apresenta melhor trabalhabilidade.

### 3.5.2. Caracterização das argamassas no estado endurecido

No estado endurecido foram realizados ensaios de determinação da densidade de massa aparente conforme a NBR 13280 (ABNT, 1995), da resistência à compressão conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007) e da resistência à tração por compressão diametral segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011).

#### 3.5.2.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido foi realizado na idade de 28 dias em 4 corpos de prova 50 mm x 100 mm, para cada argamassa, conforme a norma NBR 13280 (ABNT, 1995). A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para cada mistura.

**Tabela 9 - Resultados do ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido, conforme NBR 13280/95. Fonte: Desenvolvido pela autora.**

---

#### **DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO (NBR 13280)**

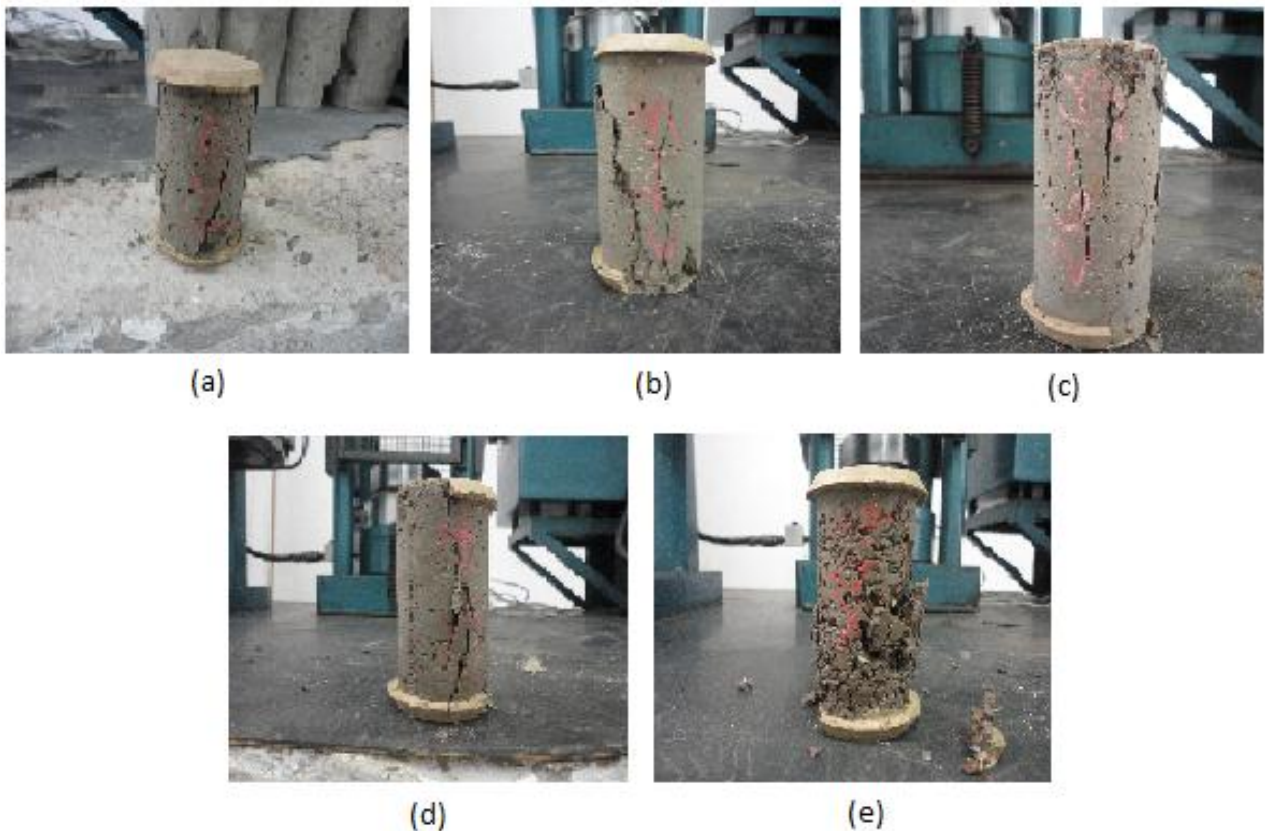
Mistura	Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )
M1 (100% AGN; 0% AGR)	2065
M2 (80% AGN; 20% AGR)	2191
M3 (70% AGN; 30% AGR)	2017
M4 (50% AGN; 50% AGR)	1993
M5 (0% AGN; 100% AGR)	1752

---

Pela Tabela 9 é possível observar que, quanto maior o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, menor é a densidade de massa aparente da argamassa, o que demonstra a maior compacidade da mistura agregado/aglomerante das argamassas com alto teor de finos.

### 3.5.2.2 Resistência à compressão

O ensaio para determinar a resistência à compressão foi realizado em corpos de prova de 50 mm x 100 mm, nas idades de 3, 7 e 28 dias, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando uma prensa EMIC DL10000 com velocidade de carregamento de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s, mantida constante durante todo o ensaio. As Figuras 13a, 13b, 13c, 13d e 13e mostram os corpos de prova rompidos após a realização do ensaio, aos 28 dias, para as diferentes misturas de argamassa.



**Figura 13 - Ensaio de resistência à compressão: a) mistura M1; b) mistura M2; c) mistura M3; d) mistura M4; e) mistura M5.**

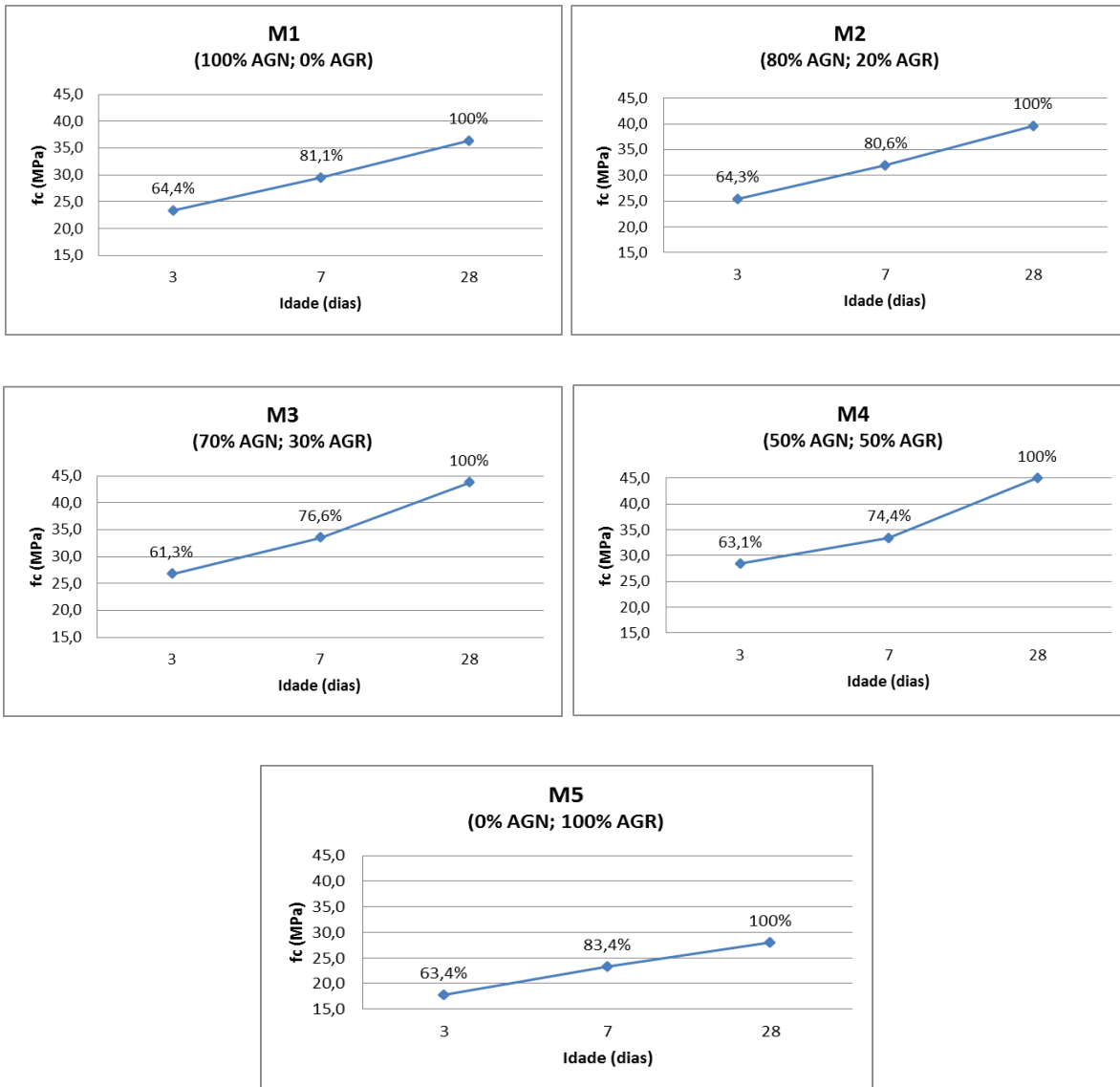
Os resultados obtidos para cada mistura estão apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado em corpos de prova 50 mm x 100 mm para cada mistura de argamassa, conforme NBR 5739/07. Fonte: Desenvolvido pela autora.**

<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NBR 5739)</b>			
Mistura	3 dias (Mpa)	7 dias (Mpa)	28 dias (Mpa)
M1 (100% AGN; 0% AGR)	23,5	29,6	36,4
M2 (80% AGN; 20% AGR)	25,5	32,0	39,6
M3 (70% AGN; 30% AGR)	26,8	33,4	43,7
M4 (50% AGN; 50% AGR)	28,4	33,5	45,0
M5 (0% AGN; 100% AGR)	17,8	23,3	28,0

Analisando os resultados da Tabela 10 constata-se que o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado tende a aumentar a resistência à compressão. A granulometria mais contínua e a maior quantidade de finos apresentada pelo agregado reciclado ajudam no efeito empacotamento e contribuem para o fechamento dos vazios. Além disso, como o agregado reciclado possui maior absorção que o agregado natural, pode haver, ainda, maior aderência entre a pasta e o agregado por meio da absorção da pasta e precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado. Contudo, a substituição total do agregado natural pelo agregado reciclado, apresentou grande prejuízo para a resistência da argamassa, provavelmente consequência do aumento da porosidade da mistura pela dificuldade do adensamento no estado fresco, ocasionada pela elevada absorção do agregado reciclado.

Os gráficos da Figura 14 apresentam a tendência de comportamento e os percentuais de crescimento da resistência à compressão em função da idade para cada uma das misturas em estudo.



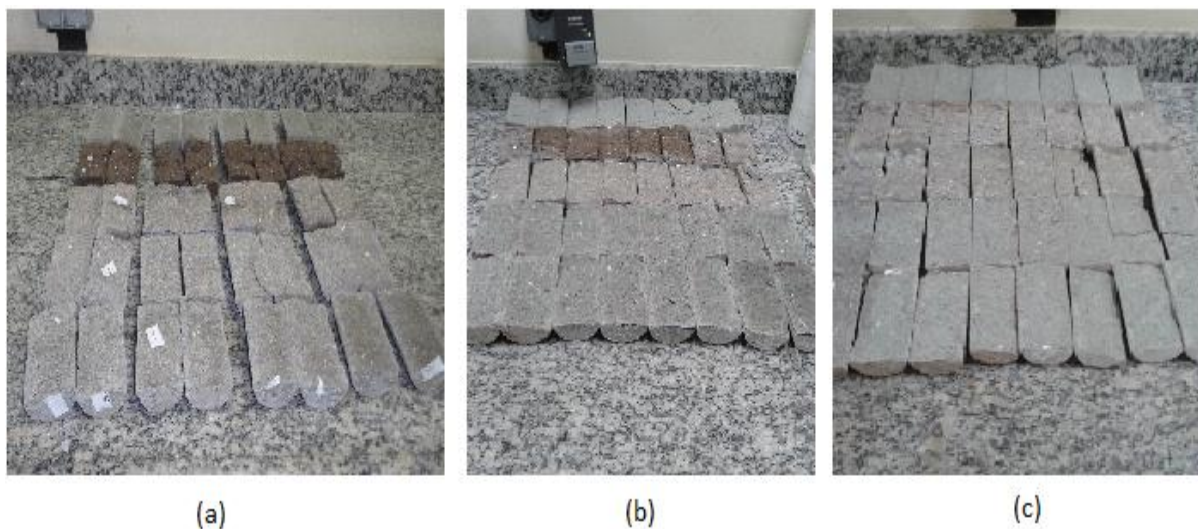
**Figura 14 - Resistência à compressão da argamassa em função do tempo. Fonte: Desenvolvido pela autora.**

É possível observar que cerca de 80% da resistência total a 28 dias é alcançada aos 7 dias. Isso demonstra uma tendência à rápida evolução da hidratação da argamassa com agregado reciclado, que pode ser resultado da taxa de absorção mais alta do agregado, que diminui a água da mistura, tornando a pasta mais densa. De acordo com Leite (2001) é possível supor que a alta absorção do agregado reciclado pode contribuir para que haja o efeito de cura interna tardia na pasta. Segundo a autora, quando boa parte da água da mistura foi combinada, existe ainda a água presente no agregado, que pode estar disponível para que as reações de hidratação continuem acontecendo. Além disso, uma possível

manifestação pozolânica no material reciclado pode contribuir para que haja um pequeno aumento na resistência da argamassa em idades mais avançadas. O efeito pozolânico pode ocorrer devido à existência de partículas muito finas de argilas pobremente calcinadas nos materiais cerâmicos geralmente presentes nos resíduos de construção e demolição.

### 3.5.2.3 Resistência à tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração por compressão diametral foi feita de acordo com a especificação da norma NBR 7222 (ABNT, 2011). O ensaio foi realizado nas idades de 3, 7 e 28 dias, com 4 corpos de prova 50 mm x 100 mm para cada idade, utilizando uma prensa Shimadzu com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min, mantida constante durante todo o ensaio. As Figuras 15a, 15b e 15c mostram os corpos de prova de todas as misturas rompidos aos 3, 7 e 28 dias, respectivamente.



**Figura 15 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral: a) rompimento aos 3 dias; b) rompimento aos 7 dias; c) rompimento aos 28 dias.**

A Tabela de 11 apresenta os resultados obtidos para cada mistura.

**Tabela 11 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado em corpos de prova 50 mm x 100 mm conforme NBR 7222/11. Fonte: Desenvolvido pela autora.**

<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (NBR 7222)</b>			
Mistura	3 dias (Mpa)	7 dias (Mpa)	28 dias (Mpa)
M1 (100% AGN; 0% AGR)	2,53	2,39	3,39
M2 (80% AGN; 20% AGR)	2,42	2,54	2,77
M3 (70% AGN; 30% AGR)	2,99	2,96	3,31
M4 (50% AGN; 50% AGR)	2,63	2,83	3,71
M5 (0% AGN; 100% AGR)	0,65	1,32	1,11

A partir da análise da Tabela 11 observa-se que alguns dos valores de resistência encontrados nas primeiras idades são maiores que os valores obtidos em idades mais avançadas para uma mesma mistura. Tal fato pode ser atribuído ao transporte dos corpos de prova que foram moldados no laboratório da empresa HOLCIM S/A e ensaiados no laboratório de estruturas da UFRJ por questões técnicas. Apesar dos desvios, é possível concluir que quanto maior é o teor de substituição do AGN pelo AGR, os valores de resistência alcançados tendem a serem maiores. Entretanto, na substituição total do agregado natural pelo agregado reciclado percebe-se que há uma significativa redução na resistência da argamassa. A alta taxa de absorção do material pode contribuir para o aumento da coesão da mistura, dificultando assim, o seu adensamento, ocasionando aumento da porosidade da argamassa e consequente diminuição da resistência à tração por compressão diametral.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resistência à tração depende do nível geral de resistência à compressão e quanto maior for a resistência à compressão axial, menor será a relação entre estas duas propriedades. Sendo assim, a relação entre a resistência à tração ( $f_t$ ) e a resistência à compressão ( $f_c$ ), aos 28 dias, é de 11-13% para o concreto de baixa

resistência, 8-10% para o concreto de média resistência e de 7% para o concreto de alta resistência. A Tabela 12 apresenta a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.

**Tabela 12 - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão das argamassas.**

Mistura	RELAÇÃO $f_t/f_c$		
	3 dias	7 dias	28 dias
M1 (100% AGN; 0% AGR)	10,77	8,07	9,31
M2 (80% AGN; 20% AGR)	9,49	7,94	6,99
M3 (70% AGN; 30% AGR)	11,16	8,86	7,57
M4 (50% AGN; 50% AGR)	9,26	8,45	8,24
M5 (0% AGN; 100% AGR)	3,65	5,67	3,96

Analisando a Tabela 12 é possível observar que a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão tende a diminuir com o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. Para Mehta e Monteiro (2008), a grande variação entre a resistência à compressão e a resistência à tração nos concretos se deve a grande quantidade de cristais de hidróxido de cálcio, podendo estes, serem reduzidos através da adição de materiais pozolânicos. A possível manifestação pozolânica do agregado reciclado pode, portanto, ter provocado a redução da relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão.



## **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **4.1. CONCLUSÕES**

O paradigma do desenvolvimento sustentável tornou-se uma referência fundamental na orientação de vários dos processos produtivos da sociedade. Vários segmentos ligados à ciência e tecnologia estão buscando alternativas para minimizar os danos causados pelo consumo indiscriminado de matéria prima e energia e pelo alto volume de resíduos gerados.

A construção civil é considerada um dos maiores agentes de degradação do meio ambiente devido ao volume de insumos minerais consumidos e a quantidade de resíduos gerados durante as atividades de construção e demolição. A reciclagem dos resíduos é portanto, uma forma do setor contribuir para redução do seu significativo impacto ambiental.

A fim de contribuir com o aumento do conhecimento sobre as características dos agregados reciclados e sobre o comportamento das argamassas quando incorporam estes materiais, este trabalho foi realizado utilizando-se resíduos cerâmicos de construção e demolição como agregado miúdo para a produção de argamassa de revestimento.

A variação do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado permitiu a análise da influência do agregado reciclado sobre as propriedades da argamassa no estado fresco (índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (densidade de massa aparente, resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral).

Pela avaliação dos resultados obtidos no ensaio que determina o índice de consistência da argamassa, é possível concluir que quanto maior o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, menor o espalhamento. A elevada taxa de absorção do agregado reciclado e o alto teor de finos em sua composição são fatores que contribuem significativamente para a redução do espalhamento.

Outra propriedade que tende a diminuir com o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado é a massa específica da argamassa. A maior

porosidade intrínseca ao agregado reciclado é uma das maiores causas para que ocorra esta redução. Observou-se também, que teor de ar incorporado está diretamente associado à massa específica da argamassa. À medida que a massa específica diminuiu, a quantidade de ar existente na argamassa aumentou. Essas propriedades estão relacionadas diretamente com a trabalhabilidade, é possível então concluir que uma argamassa com menor massa específica e maior teor de ar incorporado, apresenta melhor trabalhabilidade.

Em relação à resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral observou-se que quanto maior o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, maior a resistência da argamassa, o que aponta a existência de atividade pozolânica do agregado cerâmico reciclado. Porém, a substituição total do agregado natural pelo agregado reciclado se mostrou inviável devido à dificuldade de adensamento da mistura, o que ocasionou significativa redução tanto da resistência à compressão quanto da resistência à tração por compressão diametral das argamassas estudadas.

De forma geral, conclui-se que, com base nas características estudadas, o uso de agregados reciclados é viável para produção de argamassas de revestimento. No entanto, é importante ressaltar que a substituição total do agregado natural pelo agregado reciclado causou grandes prejuízos às resistências mecânicas da argamassa e à sua trabalhabilidade.

Por fim, salienta-se que apesar do bom comportamento apresentado pelas argamassas produzidas com agregados reciclados, outros estudos devem ser realizados com o objetivo de confirmar os resultados aqui apresentados. Além disso, devem ser consideradas outras propriedades mecânicas como a aderência e a retração, que apresentam papel fundamental no desempenho das argamassas, especialmente quanto à estanqueidade e à durabilidade.

#### **4.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestões para continuidade da pesquisa e, visando contribuir para a melhoria da compreensão das mudanças ocorridas com a substituição de agregado natural pelo agregado reciclado, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Verificar a influência da incorporação de RCD com relações água/cimento diferentes, fixando-se a trabalhabilidade da mistura;
- Realizar um estudo aprofundado sobre a possibilidade de retração e fissuração do revestimento, em função da maior finura do cimento de alta resistência inicial utilizado no programa experimental;
- Analisar a influência dos vários tipos de impurezas que podem estar presentes no material reciclado, sobre as propriedades mecânicas da argamassa;
- Realizar um estudo econômico do uso de agregados reciclados, avaliando os custos com beneficiamento dos resíduos, implantação de técnicas de reciclagem dos resíduos de construção e demolição e produção da argamassa com agregado reciclado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. “Panorama dos resíduos sólidos no Brasil”, 2011.

ANGELIM, R. R., 2000. *Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos no comportamento das argamassas de revestimentos*. Dissertação de M. Sc., Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H., 2003, “Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa”. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, V., São Paulo.

ÂNGULO, S. C., 2000. *Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados*. Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ÂNGULO, S. C. et al., 2001, “Utilização de Pilhas de Homogeneização para Controle de Agregados Miúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados”. In: *CONSTRUÇÃO 2001: por uma construção sustentável*, pp. 713- 720, Lisboa.

ANTUNES, R. P. N., 2005. *Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa*. Tese de D. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Cimento portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 7251**: Agregados em estado solto – Determinação de massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 9777**: Determinação de absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação de consistência. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 13529**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 13530**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 15258**: Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da Resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **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.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 49**: Agregado fino – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

BASTOS, I.; MAGALHÃES, L. E. *Orçamento para o lixo em 2012 chega a quase R\$ 1 bilhão; valor é bem maior que o reservado à pasta de Transportes*. [S. I.]: Jornal O GLOBO RIO, 2011. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/rio/orcamento-para-lixo-em-2012-chega-quase-1-bilhao-valor-bem-maior-que-reservado-pasta-de-transportes-2864489>. Acesso em: 11 março 2013, 16:34:43.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A., 2005, “Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone”. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI.*, pp. 95-105, Florianópolis.

CARASEK, H., 2007, “Argamassas”. In: Geraldo C. Isaia, *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, 2 ed., cap. 28, IBRACON.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, VANDERLEY M, 1997, “A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassa”. In: *Ambiente Construído*, v. 1, n. 2, pp. 37-44, jul/dez, São Paulo.

CARNEIRO, A. M. P., 1999. *Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas*. Tese de D. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A., 2005, “Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone”. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI.*, pp. 83-94, Florianópolis.

CAVANI, G. R.; ANTUNES, R. P. N.; JOHN, V. M., 1997, “Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade das argamassas mistas”. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II.*, pp. 110-119, Salvador.

CCE/CBIC – *Comissão de Economia e Estatística da Câmara Brasileira da Indústria da Construção*. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br>>. Acesso em: 14 maio 2012, 19:25:16.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C., 1995, *Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio*. Boletim Técnico n. 68, Instituto de Pesquisas, São Paulo.

DNPM – *Departamento Nacional da Produção Mineral*. “Anuário Mineral Brasileiro”, 2010, Brasília.

DORSTHORST, B. J. H.; HENDRIKS, CH. F., 2000, “Re-use of construction and demolition waste in the EU”. In: *CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE*, São Paulo, Brazil. Proceedings... [CD-ROM]. São Paulo: CIB.

FONSECA JÚNIOR, C. A. F., 2012, “Mercado de agregados no Brasil”. In: *XX Jornada de Iniciação Científica – CETEM*. Disponível em: 19 fevereiro 2013, 13:17:24.

GOMES, A. M.; NERO, J. M. G.; APPLETON, J. A. S., 1995, “Novo método para a avaliação da trabalhabilidade e consistência das argamassas”. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I.*, pp. 83-91, Goiânia.

GUIMARÃES, J. E. P., 2002. *A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia*, 2 ed., São Paulo.

HENDRICKS, C.F., 1994, “Certification system for aggregates produced from building waste and demolished buildings”. In: *Environmental aspects of construction with waste materials*, pp. 821-834, Amsterdam: Elsevier.

JOHN, V. M., 2000. *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. Tese de D. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

JOHN, V. M., 2003, “Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas”. In: *SIMPÓSIO*

*BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, V., pp. 47-63, São Paulo.

LEITE, M. B., 2001, *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Tese de D. Sc., Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LEITE, Mônica Batista, 2009. *Avaliação do comportamento tensão-deformação de concretos reciclados submetidos à compressão axial e tração direta*. Progressão acadêmica. Feira de Santana, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana.

LIMA, J. A. R., 1999, *Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos*. Dissertação de M. Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

LUCENA, L. F. L.; NEVES, G. A.; NASCIMENTO, J. D.; OLIVEIRA, D. F., 2005, “Diagnóstico da geração de resíduos da construção civil no Município de Campina Grande”. In: *Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, 4., Encontro Latino-Americano de Gestão e Economia da Construção, 1.*, Porto Alegre.

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

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., 1994, *Concreto: estrutura, propriedade e materiais*. São Paulo.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI E.D. *A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008*. Artigo científico. Ambiente Construído, pp. 57-71, Porto Alegre.

NAKAKURA, E. H., 2003. *Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a meruc*. Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.



PERA, J, 1996, “State of the art report – use of waste materials in construction in Western Europe”. In: *Workshop sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção*, pp. 1-20, São Paulo.

PILEGGI, R. G., 2001. *Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários*. Tese de D. Sc., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SABBATINI, F. H., 1984, *O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária*. Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SAGOE-CRENTSIL, K.; TAYLOR, A.; BROWN, T, 1998, “Properties of concrete incorporating fly ash and recycled demolition waste”. In: *Materials and Technologies for Sustainable Construction – CIB World Building Congress*, pp. 443-449, Gävle, Sweden.

SELMO, S. M. S., 1989. *Dosagem de argamassa de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios*. Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, N. G.; BUEST, G. T.; CAMPITELI, V. C., 2005b, “A influência do filler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento”. In: *Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem II.*, pp. 1-12, São Paulo.

SOUZA, U.E.L. et al.,1999, “Desperdício de materiais nos canteiros de obras: a quebra do mito”. In: *SIMPÓSIO NACIONAL – DESPERDÍCIO DE MATERIAIS NOS CANTEIROS DE OBRAS: A QUEBRA DO MITO*, São Paulo.

TAYLOR, H.F.W., 1967. *Enciclopedia de la química industrial - la química de los cementos*, v. 1, Bilbao-Espanha: URMO.

VALVERDE, F. M., 2001, “Agregados para construção civil”. In: *Balanço Mineral Brasileiro*, Brasil.

YOSHIDA, A. T.; BARROS, M. M. S. B., 1995, “Caracterização de argamassas no estado fresco: peculiaridade na análise de argamassas industrializadas”. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I.*, pp. 53-62, Goiânia.

ZWAN, J.T., 1997, "Application of waste materials – a success now, a success in the future". In: *WASTE MATERIALS IN CONSTRUCTIONS: PUTTING THEORY INTO PRACTICE*, p.869-81, Great Britain.