



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND

Gabrielle Christina da Silva Calçado

Rio de Janeiro
Fevereiro, 2015



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND

Gabrielle Christina da Silva Calcado

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 Engenheira Civil.

Orientadores: Elaine Garrido Vazquez

Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro
Fevereiro, 2015

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS
DE CIMENTO PORTLAND**

Gabrielle Christina da Silva Calçado

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 ENGENHEIRA CIVIL.

Examinada por:

Profª Elaine Garrido Vazquez, D.Sc.

Profº Romildo Dias Toledo Filho, D. Sc.

Profª Luciane Farias Ribas, D. Sc.

Profª Ana Arai, M. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2015

Calcado, Gabrielle Christina da Silva

Influência da adição de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento Portland/ Gabrielle Christina da Silva Calcado. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

XIII, 101 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Elaine Garrido Vazquez

Romildo Dias Toledo Filho

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Engenharia Civil, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 94-101.

1. Resíduos de construção e demolição. 2. Argamassa. 3. Agregados reciclados. 4. Substituição. I.Vazquez, Elaine Garrido; Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III Influência da adição de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento Portland.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus pela oportunidade de concluir minha graduação na profissão e na universidade que sempre sonhei.

A meus pais, Náilda e Tadeu, pelos valores e princípios ensinados, pelo amor e pelo apoio nos momentos de ansiedade, tristeza e desânimo.

A minhas irmãs, Danielle e Karoline, pelo companheirismo, pela amizade e cumplicidade.

A minha sobrinha, Lara, por alegrar minha vida com sua inocência, alegria e meiguice.

A meu namorado, Levy, pelo amor, compreensão, apoio e paciência durante esses quatro anos juntos.

A meus amigos, Arthur, Camilla, Hiram e Isabelle, pelo companheirismo e amizade durante esses cinco árduos anos. Agradeço também as minhas “amigas-irmãs” Daniele, Raquel, Stella e Thais, pela amizade e pelo apoio em todos os momentos que precisei.

Aos funcionários e alunos do Laboratório de Estruturas e Materiais (LABEST) da COPPE/UFRJ por toda colaboração nas atividades desenvolvidas.

Aos meus orientadores Elaine e Romildo, pelo apoio, paciência e confiança depositada em mim.

Aos engenheiros que pude conviver na fase de estágio, por compartilharem seus conhecimentos e experiências e por acreditarem em mim.

À professora e minha orientadora, Elaine, por ter se tornado uma grande amiga e por todo apoio nas questões profissionais e pessoais durante esses anos de convivência.

RESUMO

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND

Gabrielle Christina da Silva Calçado

Fevereiro, 2015

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

Orientadores: Elaine Garrido Vazquez

Romildo Dias Toledo Filho

Curso: Engenharia Civil

A construção civil é uma das grandes propulsoras da economia mundial, uma vez que possui uma grande capacidade de elevar a taxa de emprego e de renda, além de promover o desenvolvimento dos países. Entretanto, esse setor também é responsável pelo consumo excessivo dos recursos naturais e pela geração da maior parcela de resíduos sólidos na malha urbana. Nesse contexto, a reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) se apresenta como um modo de minimizar os impactos gerados pela construção civil e cada vez mais vem sendo adotada no mundo. No Brasil, essa destinação é ainda incipiente e para que seja impulsionada, pesquisas a respeito do uso de agregados reciclados na produção de argamassas e concretos devem ser desenvolvidas. Neste estudo buscou-se avaliar a influência dos agregados reciclados de RCD no comportamento de argamassas de cimento Portland de três traços (argamassa rica, mediana e pobre). Além das misturas de referência, foram produzidas argamassas com três diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado, as quais foram submetidas a ensaios físicos e mecânicos no Laboratório de Estruturas e Materiais (LABEST) - COPPE/UFRJ. O estudo mostrou que os resultados foram satisfatórios para misturas de argamassa mediana com até 25% de substituição e de argamassa pobre com até 50%.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição, argamassa, agregados reciclados, substituição.

ABSTRACT

INFLUENCE OF ADDITION OF RECYCLED AGGREGATE FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE ON THE PERFORMANCE OF MORTAR OF PORTLAND CEMENT

Gabrielle Christina da Silva Calcado

February, 2015

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

Advisors: Elaine Garrido Vazquez
Romildo Dias Toledo Filho

Course: Civil Engineering

The construction industry is one of the major drivers of the world economy, since it has a great ability to raise employment and income rates, in addition to promoting the development of countries. However, this sector is also responsible for excessive consumption of natural resources and the generation of the largest portion of solid waste in urban environment. In this context, the recycling of construction and demolition waste (CDW) is presented as a way to minimize impacts caused by construction and each time has been most widely adopted in the world. In Brazil, this destination is still incipient and to be disseminated, research about the use of recycled aggregates in the production of mortar and concrete should be developed. In this study aimed to evaluate the influence of recycled aggregates of CDW on the behavior of Portland cement mortars of three mix design compositions (rich mortar, mid mortar and poor mortar). In addition to the reference mixtures, mortars were produced with three different substitution contents of natural aggregate by recycled, which were subjected to mechanical and physical tests in the Laboratory of Structures and Materials (LABEST) - COPPE/UFRJ. The study showed that the results were satisfactory for mid mortar mixtures with up to 25% and for poor mortar with up to 50%.

Keywords: Construction and demolition waste, mortar, recycled aggregates, substitution.

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS | xi |
| LISTA DE TABELAS | xiii |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA | 1 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 2 |
| 1.3 OBJETIVO..... | 3 |
| 1.4 METODOLOGIA | 4 |
| 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO | 4 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES | 6 |
| 2.2. DEFINIÇÃO E COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)..... | 7 |
| 2.3. FORMAS DE GERAÇÃO DE RCD | 10 |
| 2.4. IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXTRAÇÃO DE MATÉRIA PRIMA E GERAÇÃO DE RCD..... | 11 |
| 2.5. PROCESSO DE RECICLAGEM DE RCD | 12 |
| 2.6. POLÍTICAS E INCENTIVOS ADOTADOS NO BRASIL E NO MUNDO . | 14 |
| 2.7. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS | 19 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 25 |
| 3.1. MATERIAIS | 25 |
| 3.1.1. Cimento Portland | 25 |
| 3.1.2. Água..... | 27 |
| 3.1.3. Agregado Natural..... | 27 |
| 3.1.4. Agregado Reciclado..... | 28 |
| 3.2. MÉTODOS | 29 |
| 3.2.1. Propriedades Físicas Dos Agregados..... | 29 |
| 3.2.1.1 Massa Específica..... | 29 |
| 3.2.1.2 Análise Granulométrica..... | 30 |
| 3.2.2. Dosagem, Moldagem, Adensamento e Cura | 31 |
| 3.2.3. Propriedade no Estado Fresco | 33 |
| 3.2.3.1 Consistência..... | 33 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.2.4. | Propriedades Mecânicas | 34 |
| 3.2.4.1 | Resistência à compressão e módulo de elasticidade..... | 34 |
| 3.2.4.2 | Resistência à tração por compressão diametral..... | 36 |
| 3.2.5. | Propriedades Físicas | 38 |
| 3.2.5.1 | Absorção de água por capilaridade..... | 38 |
| 3.2.5.2 | Absorção por imersão..... | 40 |
| 4. | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 42 |
| 4.1. | ANÁLISE GRANULOMÉTRICA | 42 |
| 4.1.1. | Agregado Natural..... | 42 |
| 4.1.2. | Agregado Reciclado | 43 |
| 4.1.3. | Comparação dos Resultados do Agregado Natural com o Reciclado | 44 |
| 4.2. | MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS | 45 |
| 4.3. | TRABALHABILIDADE | 46 |
| 4.3.1. | Misturas de Argamassa Rica | 46 |
| 4.3.2. | Misturas de Argamassa Mediana | 46 |
| 4.3.3. | Misturas de Argamassa Pobre | 48 |
| 4.4. | PROPRIEDADES MECÂNICAS | 52 |
| 4.4.1. | Ensaio de Resistência à Compressão Axial | 53 |
| 4.4.1.1 | Misturas de Argamassa Rica..... | 53 |
| 4.4.1.2 | Misturas de Argamassa Mediana..... | 56 |
| 4.4.1.3 | Misturas de Argamassa Pobre..... | 59 |
| 4.4.2. | Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral | 62 |
| 4.4.2.1 | Misturas de Argamassa Rica..... | 62 |
| 4.4.2.2 | Misturas de Argamassa Mediana..... | 63 |
| 4.4.2.3 | Misturas de Argamassa Pobre..... | 64 |
| 4.5. | PROPRIEDADES FÍSICAS | 65 |
| 4.5.1. | Absorção de Água por Capilaridade | 65 |
| 4.5.1.1 | Misturas de Argamassa Rica..... | 65 |
| 4.5.1.2 | Misturas de Argamassa Mediana..... | 67 |
| 4.5.1.3 | Misturas de Argamassa Pobre..... | 69 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5.2. Absorção por Imersão | 71 |
| 4.5.2.1 Misturas de Argamassa Rica..... | 71 |
| 4.5.2.2 Misturas de Argamassa Mediana..... | 74 |
| 4.5.2.3 Misturas de Argamassa Pobre..... | 77 |
| 4.6 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DAS MISTURAS DE ARGAMASSA | 80 |
| 4.7 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO | 82 |
| 4.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS MECÂNICOS EM ESTUDO E DO PROJETO DE GRADUAÇÃO DE ALVES (2012)..... | 84 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 90 |
| 5.1 CONCLUSÕES | 90 |
| 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 93 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 94 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Análise visual dos agregados através de microscopia eletrônica por varredura. (a) Agregado Natural; (b) Agregado reciclado. | 22 |
| Figura 2- Curva granulométrica do CPI-32..... | 25 |
| Figura 3 - Rio Guandu- RJ. | 28 |
| Figura 4 -a) RCD do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho b) Queixada 200. | 29 |
| Figura 5- Picnômetro a gás AccuPyc II1340..... | 30 |
| Figura 6 - Agitador mecânico de peneiras – Laboratório Tecnologia Mineral..... | 30 |
| Figura 7- Espalhamento da mistura de referência da argamassa rica..... | 33 |
| Figura 8- (a) Prensa servo-controlada Shimadzu UH-F1000kNI; (b) Transdutores elétricos no corpo de prova; (c) Corpos de prova após rompimento. | 35 |
| Figura 9- (a) Prensa servo-controlada Shimadzu UH-F1000kNI; (b) Momento da ruptura de um disco; (c) Discos após ruptura..... | 37 |
| Figura 10 - Ensaio de absorção por capilaridade | 39 |
| Figura 11 – Gráfico típico do acréscimo de massa aparente em função da raiz quadrada do tempo. | 39 |
| Figura 12 - (a) Amostras esfriando após ebulição; (b) Balança hidrostática..... | 41 |
| Figura 13- Curva granulométrica do agregado natural..... | 42 |
| Figura 14- Curva granulométrica do agregado reciclado..... | 43 |
| Figura 15- Curva granulométrica do agregado reciclado..... | 44 |
| Figura 16 - Espalhamento das misturas de argamassa rica | 47 |
| Figura 17 – Espalhamento das misturas com diferentes teores de substituição da argamassa rica. – (a) M1, (b) M1-15%, (c) M1-25%, (d) M1-50%..... | 48 |
| Figura 18 - Espalhamento das misturas de argamassa mediana | 49 |
| Figura 19 – Espalhamento das misturas com diferentes teores de substituição da argamassa mediana. – (a) M2, (b) M2-15%, (c) M2-25%,(d) M2-50% | 50 |
| Figura 20 - Espalhamento das misturas de argamassa pobre | 51 |
| Figura 21 – Espalhamento das misturas com diferentes teores de substituição da argamassa pobre. – (a) M3, (b) M3-15%, (c) M3-25%, (d) M3-50% | 52 |
| Figura 22 - Curvas tensão x deformação de um dos corpos de prova das diferentes misturas de argamassa rica..... | 53 |
| Figura 23 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa rica | 54 |
| Figura 24 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa rica | 55 |
| Figura 25 - Curvas tensão x deformação de um dos corpos de prova das diferentes misturas de argamassa mediana..... | 56 |
| Figura 26 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa mediana | 57 |
| Figura 27 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa mediana | 58 |
| Figura 28 - Curvas tensão x deformação de um dos corpos de prova das diferentes misturas de argamassa pobre..... | 59 |
| Figura 29 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa pobre | 60 |
| Figura 30 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa pobre..... | 61 |
| Figura 31- Resistência à tração das misturas de argamassa rica..... | 62 |
| Figura 32- Resistência à tração das misturas de argamassa mediana | 63 |
| Figura 33- Resistência à tração das misturas de argamassa pobre..... | 64 |
| Figura 34 - Ganho acumulativo de água em função da raiz quadrada do tempo para as misturas de argamassa rica | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 35 - Ganho acumulativo de água em função da raiz quadrada do tempo para as misturas de argamassa mediana | 69 |
| Figura 36 - Ganho acumulativo de água em função da raiz quadrada do tempo para as misturas de argamassa pobre | 70 |
| Figura 37- Massa específica das misturas de argamassa rica | 72 |
| Figura 38-Absorção das misturas de argamassa rica..... | 73 |
| Figura 39 - Índices de vazios nas misturas de argamassa rica..... | 74 |
| Figura 40 - Massa específica para as misturas de argamassa mediana..... | 75 |
| Figura 41- Absorção das misturas de argamassa mediana..... | 76 |
| Figura 42- Índice de vazios das misturas de argamassa mediana | 77 |
| Figura 43 - Massa específica das misturas de argamassa pobre | 78 |
| Figura 44 - Absorção das misturas de argamassa pobre | 79 |
| Figura 45 - Índice de vazios das misturas de argamassa pobre | 80 |
| Figura 46 - Relação entre propriedades mecânicas e físicas para as misturas de referência..... | 81 |
| Figura 47- Valores da resistência à compressão das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo..... | 85 |
| Figura 48 - Valores do módulo de elasticidade das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo..... | 87 |
| Figura 49 - Valores da resistência à tração das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo..... | 88 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Resultados dos ensaios físicos do Cimento CPI-32..... | 26 |
| Tabela 2 – Resultados dos ensaios químicos do Cimento CPI-32..... | 26 |
| Tabela 3 – Resultados dos ensaios mecânicos do Cimento CPI-32..... | 27 |
| Tabela 4- Parâmetros granulométricos do agregado natural | 43 |
| Tabela 5 - Parâmetros granulométricos do agregado reciclado..... | 44 |
| Tabela 6 - Comparação dos parâmetros granulométricos do agregado natural com do reciclado | 45 |
| Tabela 7 - Massa específica dos agregados..... | 46 |
| Tabela 8- Espalhamento das misturas de argamassa rica..... | 47 |
| Tabela 9 - Espalhamento das misturas de argamassa mediana..... | 49 |
| Tabela 10 - Espalhamento das misturas de argamassa pobre | 51 |
| Tabela 11 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa rica..... | 54 |
| Tabela 12 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa rica | 55 |
| Tabela 13 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa mediana..... | 57 |
| Tabela 14 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa mediana | 58 |
| Tabela 15 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa pobre..... | 60 |
| Tabela 16 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa pobre | 61 |
| Tabela 17 - Resistência à tração das misturas de argamassa rica | 62 |
| Tabela 18- Resistência à tração das misturas de argamassa mediana | 63 |
| Tabela 19- Resistência à tração das misturas de argamassa pobre..... | 64 |
| Tabela 20- Absortividade e ponto de saturação das misturas de argamassa rica..... | 66 |
| Tabela 21- Absortividade e ponto de saturação das misturas de argamassa mediana | 68 |
| Tabela 22- Absortividade e ponto de saturação das misturas de argamassa pobre | 70 |
| Tabela 23 - Massa específica das misturas de argamassa rica..... | 71 |
| Tabela 24 - Absorção das misturas de argamassa rica..... | 72 |
| Tabela 25 - Índice de vazios das misturas de argamassa rica..... | 73 |
| Tabela 26- Massa específica das misturas de argamassa mediana..... | 74 |
| Tabela 27- Absorção das misturas de argamassa mediana..... | 75 |
| Tabela 28- Índice de vazios das misturas de argamassa mediana..... | 76 |
| Tabela 29- Massa específica das misturas de argamassa pobre..... | 77 |
| Tabela 30- Absorção das misturas de argamassa pobre..... | 78 |
| Tabela 31- Índice de vazios das misturas de argamassa pobre..... | 79 |
| Tabela 32- Relação entre as propriedades mecânicas e físicas das misturas de referências | 81 |
| Tabela 33- Relação entre a resistência à tração e à compressão para as misturas de argamassa rica..... | 82 |
| Tabela 34- Relação entre a resistência à tração e à compressão para as misturas de argamassa mediana | 83 |
| Tabela 35- Relação entre a resistência à tração e à compressão para as misturas de argamassa pobre | 83 |
| Tabela 36 – Valores da resistência à compressão das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo..... | 86 |
| Tabela 37 – Valores do módulo da elasticidade das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo..... | 87 |
| Tabela 38 – Valores da resistência à tração das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo..... | 89 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

Nos últimos anos, o acentuado crescimento industrial dos países emergentes integrantes do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) sugere que a demanda por matérias-primas irá aumentar ainda mais nas próximas décadas (MOLL, 2005). Já a maioria dos países desenvolvidos vem sofrendo a escassez de recursos naturais, como a brita e a areia. Frente a esses acontecimentos, a busca por meios de aumentar a eficiência do uso dos materiais se torna cada vez mais relevante.

A construção civil apresenta uma importante participação na economia brasileira, sendo responsável pela maior extração de recursos naturais para uso industrial e pela geração de uma quantidade significativa de resíduos durante o processo construtivo, os quais são denominados Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Os resíduos gerados na construção são decorrentes de erros, indefinições na elaboração dos projetos e falhas na execução, ocasionando substituição de componentes e desperdício. Podem ainda ocorrer devido a perdas na estocagem e no transporte, a má qualidade dos materiais empregados e a demolições e reformas, onde há substituição dos materiais com vida útil esgotada (LIMA, 2005).

Nas últimas décadas, políticas e incentivos vêm sendo adotados pelo Estado e empresas privadas visando promover o desenvolvimento com menor impacto possível. No Brasil, a Resolução 307/2002 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) proporcionou um grande avanço na construção civil, visto que ela atribui responsabilidades aos geradores, transportadores e gestores públicos do RCD. O gerador dos resíduos é responsável também pela sua destinação e por essa razão as empresas buscam medidas visando à redução de perdas e aproveitamento de resíduos através da reciclagem. Neste sentido, a reutilização e reciclagem de resíduos sólidos apresentam diversas vantagens potenciais do ponto de vista do desenvolvimento sustentável (SILVA, 2000). A reciclagem do RCD possibilita o seu retorno ao ciclo produtivo, reduzindo a extração de matéria-prima, a poluição originada por seu descarte inadequado, além de uma economia nos custos da obra como em materiais e transporte. Já a reutilização possibilita que resíduos sejam utilizados sem que haja necessidade

processos de beneficiamento, podendo ocorrer com blocos, tijolos, cerâmicas, entre outros.

Várias pesquisas comprovaram a viabilidade do uso de agregados reciclados tanto na fração graúda (OIKONOMOU, 2005; ETXEBERRIA et al., 2007) como na miúda (EVANGELISTA & BRITO, 2007; 2010) para a produção de concreto. Leite *et. al.* (2000), Moriconi *et. al.* (2009) e outros pesquisadores mostraram que as substituições parciais dos agregados naturais pelos reciclados em argamassas também podem apresentar desempenho satisfatório.

O IBGE (2010) constatou que 72,45% dos municípios brasileiros realizam a coleta de RCD, sendo que realizam desses, apenas 9,7% possuem alguma forma de processamento que permitam a reciclagem (ROMA; MOURA, 2011). Apesar de muitos resíduos já estarem sendo reciclados por empresas privadas e pelo poder público, a reciclagem de RCD ainda precisa ser estimulada.

Em algumas indústrias, rejeitos já retornam ao ciclo produtivo e são utilizados como insumos nos processos da construção civil, como a sílica ativa, a escória de alto forno, entre outros. Entretanto, foi necessária a realização de diversas pesquisas até serem implementados, o que despendeu um longo período de tempo. O resíduo de construção e demolição merece similarmente um estudo sistemático para a sua aplicação efetiva. (LEITE, 2001).

1.2 JUSTIFICATIVA

Os estudos visando viabilizar a substituição do agregado natural por agregados reciclados se justificáveis ao analisar o crescente aumento que vem ocorrendo na distância entre as fontes de recursos naturais e os locais de novas construções. Em 1992, Hansen já falava da dificuldade de encontrar bons agregados naturais próximos a áreas urbanas.

Além da intensa exploração dos recursos naturais, de acordo com Pimentel *et. al.* (2007), os resíduos gerados são abandonados e estocados de maneira imprópria no Brasil, sendo que, de todo o lixo gerado pelas grandes cidades, 50% corresponde a resíduos provenientes da construção civil.

Diante desses acontecimentos, nas últimas décadas, o uso de materiais alternativos na produção de argamassas e concretos vem ganhando mais espaço e se mostrando vantajoso. Segundo John (2000), a reciclagem na construção civil pode trazer benefícios como: a redução no consumo de recursos naturais não renováveis, de energia durante o processo produtivo e de áreas necessárias para aterro. A reciclagem se torna ainda mais interessante pelo fato do mercado da construção civil se apresentar como uma das melhores alternativas para o consumo de materiais reciclados, já que as construções podem ser realizadas em qualquer local, permitindo assim uma redução nos custos (JOHN, 1996).

Além disso, algumas pesquisas (PERA, 1996, SAGOE-CRENTSIL *et al.*, 1998) demonstraram que cerca de 40 a 50% de todo o material reciclado se torna finos, o que sugere a substituição da areia natural por este material. Entretanto, para que um novo produto seja aceito no mercado, em qualquer indústria, é necessário conhecer muito bem o seu comportamento físico, químico e tecnológico (LEITE, 2001).

1.3 OBJETIVO

O presente estudo tem como principal objetivo avaliar a influência da substituição parcial do agregado natural pelo reciclado no desempenho de diferentes traços de argamassa de cimento Portland. Para isso, foram produzidas misturas de argamassa rica, mediana e pobre, e foram utilizados teores de substituição de 15%, 25% e 50%, além das misturas de referência.

Além disso, tem-se também como objetivo comparar o desempenho das argamassas produzidas com agregado reciclado e as que possuem apenas agregado natural através da realização de ensaios de consistência por espalhamento, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção por capilaridade e absorção por imersão das misturas de argamassa, além da caracterização dos agregados. Por fim, busca-se realizar uma comparação entre os resultados obtidos no projeto final de graduação da aluna Lais Alves (2012) com os obtidos neste trabalho, visto que foi dado prosseguimento ao mesmo.

A partir das análises que serão realizadas, pretende-se ampliar o conhecimento nesta área e verificar a viabilidade técnica da utilização do agregado reciclado proveniente de

RCD como matéria-prima, possibilitando, desta forma, inserção de novos materiais no mercado.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho foi dividida em três etapas. A primeira apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto tratado, onde serão analisados o conceito, a composição e a geração dos resíduos de construção e demolição, a reciclagem, legislação, entre outros assuntos.

Na sequência, é realizada uma análise experimental de argamassas com diferentes teores de substituição de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado, onde serão definidos os traços e será apresentada a caracterização dos materiais utilizados. Será também abordada a nomenclatura das misturas juntamente a sua composição e em seguida, serão descritos os ensaios realizados e as normas utilizadas.

Por fim, a última etapa é a apresentação e a análise dos resultados obtidos nos ensaios. Serão realizadas comparações entre as misturas de argamassa e será discutida a influência do traço nas propriedades apresentadas. De acordo com os resultados obtidos, algumas sugestões para próximos estudos serão feitas visando buscar explicações e ampliar o conhecimento sobre a influência do uso de RCD como agregado miúdo na produção de argamassas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 consiste numa breve introdução ao tema e aborda os fatores que motivaram a pesquisa. Apresenta também os objetivos, a metodologia adotada e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que serviu como base ao trabalho. Será realizado um panorama da utilização dos resíduos de construção e demolição ao decorrer dos anos no Brasil e nos demais países, serão abordados também a definição e composição do RCD, as suas formas de geração, os impactos ocasionados pelo setor da construção civil, a reciclagem do RCD, as políticas e incentivos adotados no cenário nacional e internacional e ainda serão discutidas algumas propriedades dos agregados reciclados.

O Capítulo 3 é dedicado à descrição do programa experimental realizado. Neste capítulo são especificados os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa. Também é apresentada uma descrição dos procedimentos de preparo das amostras e dos métodos de ensaios para a determinação das propriedades físicas e mecânicas das argamassas, juntamente as normas correspondentes.

O Capítulo 4 engloba os resultados obtidos no procedimento experimental e a análise dos mesmos. Numa primeira fase, procedeu-se a análise das características granulométricas dos materiais. Em seguida, foi feita a análise da resistência à compressão, da resistência à flexão, do módulo de elasticidade, da capacidade de absorção de água por capilaridade e por imersão. Estes resultados são apresentados em tabelas e gráficos, visando assim auxiliar na comparação entre as amostras com diferentes porcentagens de substituição da areia por RCD e as convencionais. Foi realizada também uma comparação com os resultados obtidos pela aluna Lais Alves (2012) nas propriedades: resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral. Desta forma, busca-se obter conclusões sobre a influência dos agregados reciclados em argamassas de cimento Portland.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e algumas sugestões de estudos futuros e, em seguida, são exibidas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A construção civil é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento e desde a antiguidade gerava uma expressiva quantidade de resíduos como subproduto, fato este que despertou interesse de construtores já na época da edificação das cidades do Império Romano. Sabe-se que nesse período foram realizados os primeiros registros de reutilização de resíduos minerais da construção civil em novas obras (LEVY, 2000).

A partir de 1928, observou-se que as pesquisas relacionadas aos resíduos provenientes de alvenaria britada e concreto ganharam mais espaço e começaram a ser desenvolvidas de forma sistemática. Contudo, somente após o término da 2ª Guerra Mundial foi registrada a primeira aplicação significativa dos resíduos de construção e demolição (RCD). Como muitas cidades Europeias foram destruídas e tiveram suas edificações demolidas, buscou-se dar um destino para os RCD gerados e, desta forma, os mesmos foram britados e utilizados como agregados na reconstrução das cidades (WEDLER; HUMMEL, 1946 apud LEVY, 1997), o que permite dizer que a reciclagem dos resíduos de construção e demolição teve início de fato a partir de 1946 (LEVY, 2000).

Nas últimas décadas, devido às questões ambientais e econômicas, a reciclagem dos RCD vem ganhando mais importância e, por esse motivo, estão sendo desenvolvidas pesquisas e proposições de normatização em muitos países, entre os quais se encontram: Holanda, Dinamarca, Estados Unidos, França, Itália, Rússia e Brasil (NENO, 2010).

De acordo com Ângulo (2005), alguns países como a Holanda, Alemanha, Dinamarca e Suíça, conseguem reutilizar e reciclar de 50% a 90% do RCD gerado. Entretanto, apesar do alto índice de reciclagem dos resíduos gerados, segundo Mueller (2007), na média, menos de 20% do agregado natural é substituído pelo agregado reciclado nesses países, indicando que a regularização de terrenos e aterramento são os principais destinos dados a esses resíduos.

No Brasil, as primeiras pesquisas a respeito do uso de agregados reciclados de resíduos de construção civil foram realizadas em argamassas por Pinto (1986) e Levy (1997), em pavimentos por Bodi (1997) e em concretos por Zordan (1997). Já as primeiras usinas

de reciclagem foram instaladas pelas Prefeituras de São Paulo em 1991, de Londrina em 1993 e de Belo Horizonte em 1994 (MIRANDA et. al., 2009).

Nota-se que a partir de 2000, o assunto vem sendo discutido com mais vigor no Brasil através de pesquisas relacionadas à variabilidade dos agregados (ANGULO, 2000), ao uso de agregados reciclados em argamassas (MIRANDA, 2000, 2005), em concretos pré-moldados (BUTLER, 2003; SOUZA, 2001) e em concretos em geral (ANGULO, 2005; LEITE, 2001).

2.2. DEFINIÇÃO E COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

“Resíduos da construção civil são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc” (CONAMA N°307, 2002). A NBR 15113:2004 – “Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação” respeita as disposições presentes nesta Resolução do CONAMA e aplica a mesma definição.

De acordo com o dicionário Aurélio o entulho, como vulgarmente esses resíduos são denominados, é definido como “Caliça, pedregulhos, areia, tudo que sirva para aterrar, nivelar depressão de terreno, vala. Restos de tijolos, argamassa. Materiais inúteis resultantes da demolição. Caliça, Fragmentos de argamassa resultantes da demolição de obras de alvenaria”.

Além da definição adotada para os resíduos da construção civil, a Resolução nº 307 do CONAMA (2002) define os agregados reciclados como materiais granulares provenientes do beneficiamento desses resíduos que apresentam características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura ou outras obras de engenharia. Segundo a mesma, os resíduos de construção devem obedecer a classificação presente no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos resíduos de construção.

| Classificação | Descrição |
|----------------|---|
| I - Classe A | Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: |
| | a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; |
| | b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; |
| | c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras; |
| II - Classe B | Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros; |
| III - Classe C | Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso; |
| IV - Classe 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. |

Fonte: CONAMA, resolução nº 307 (2002) - Adaptado.

No Brasil, as usinas de reciclagem classificam o RCD conforme a coloração da sua fração mineral. De acordo com Ângulo (2005), a parcela cinza é predominantemente composta de materiais de construção com base cimentícia e, em tese, podem ser utilizados em componentes à base de cimento como blocos de concreto e calçamento, além de bases de pavimentação. Já a parcela vermelha é predominantemente formada por materiais de construção de natureza cerâmica, especialmente do tipo vermelha, e podem ser empregados em atividades de pavimentação. Segundo Carneiro (2005), verificou-se que, na maioria das cidades já estudadas, o RCD é composto majoritariamente por materiais cimentícios (concreto e argamassa).

Uma característica observada nos resíduos de construção e demolição que dificulta o seu retorno ao processo construtivo é a heterogeneidade em relação a seus componentes e às suas quantidades. Pinto (2013) ressalta que o RCD apresenta uma composição muito diversificada e heterogênea por ser constituída de quaisquer materiais que compuseram um edifício, uma infraestrutura ou de materiais utilizados durante a execução da obra.

Caso processos de controle não sejam instalados em Centrais de Reciclagem, outro complicador para a reciclagem do RCD observado é a introdução maciça do gesso como revestimento e de placas, o que aumenta a heterogeneidade dos resíduos (ÂNGULO *et al.*, 2001).

Existem também no RCD componentes inorgânicos e minerais, como concretos, argamassas e cerâmicas, e componentes orgânicos, plásticos, materiais betuminosos, entre outros (ÂNGULO; JOHN, 2002). Uma possível solução para a separação de contaminantes como plásticos e madeiras é o emprego de tanques de depuração por flotação e separadores magnéticos (QUEBAUD; BUYLE-BODIN, 1999); contudo, em alguns casos, a retirada das fases contaminantes pode ser mais complexa, como no caso de compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos (MULDER *et al.*, 2000).

A composição dos resíduos de construção e demolição também depende da região geográfica, da época do ano e do tipo da obra. Em obras de construção, por exemplo, os resíduos dependem do estágio da obra, uma vez que no estágio da concretagem da estrutura há predominância de fragmentos de concreto, aço e madeira, enquanto durante a alvenaria e o revestimento, há maior incidência de tijolos, cerâmicas, e restos de argamassa (POON *et al.*, 2001). Diferentemente das novas construções, os resíduos gerados em demolições e reformas são encontrados na sua forma final, como paredes de alvenaria, pisos revestidos, concreto armado, entre outros (LIMA, 2005).

Outros fatores podem influenciar a porcentagem e o tipo de materiais que constituem o RCD, entre os quais estão: os modelos de gestão adotados pelas empresas, o nível de desenvolvimento técnico da indústria da construção local, a qualidade e treinamento da mão de obra disponível, as técnicas de construção e demolição empregadas, os programas de qualidade, as práticas de reciclagem, a disponibilidade de materiais na região, o desenvolvimento econômico da região e demanda de novas construções, entre outros (OLIVEIRA *et al.*, 2004 apud CARIJÓ, 2005).

Visando reduzir essa variabilidade da composição e das outras propriedades dos agregados provenientes dos resíduos de construção e demolição, pode-se realizar o manejo em pilhas de homogeneização. Deste modo, esses agregados podem ser empregados em diversas finalidades mais nobres, desde que haja um controle adequado, e possibilita também a valorização dos resíduos (ÂNGULO, 2000).

2.3. FORMAS DE GERAÇÃO DE RCD

Sabe-se que na construção civil tradicional ocorre muito desperdício devido ao sistema construtivo que utiliza técnicas geralmente muito antiquadas. Grande parte deste material de construção poderia ser reaproveitada, contudo não é o que acontece. (BOURSCHEID, 2010).

O SINDUSCON-CE (2011) afirma que esse desperdício de materiais ocorrido durante a construção de uma edificação é o principal responsável pela geração de RCD no canteiro de obras e ocorre em diferentes fases e por diversas razões. As perdas podem ser ocasionadas por superprodução, por manutenção de estoques, pela fabricação de produtos defeituosos e podem ocorrer também durante o transporte e no processamento.

Segundo Leite (2001), a geração desses resíduos pode ocorrer devido à falta de qualidade dos bens e serviços que dá origem às perdas de materiais que saem das obras na forma de entulho; também devido à urbanização desordenada que faz com que as construções passem por adaptações e modificações gerando mais resíduos; ao aumento do poder aquisitivo da população e às facilidades econômicas que impulsionam o desenvolvimento de novas construções e reformas e às estruturas de concreto mal concebidas que ocasionam a redução de sua vida útil e geram grandes volumes de resíduos ao necessitar de manutenção corretiva.

A falta de controle do processo construtivo é reiterada por Souza (2005) como o motivo para a geração de resíduos. De acordo com o mesmo, uma grande parcela desses resíduos poderia ser evitada durante a concepção e a execução do projeto. Contudo, a etapa de demolição faz parte do processo construtivo e, inevitavelmente, dá origem aos resíduos de construção e demolição.

De acordo com Bourscheid (2010), o desperdício seria reduzido, com tendência a nulo, caso fossem adotados sistemas construtivos com técnicas mais avançadas, as quais já existem atualmente. O autor exemplifica ao citar o uso de elementos pré-moldados, painéis de chapas cimentícias, painéis de gesso acartonado e estrutura em aço em construções.

2.4. IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXTRAÇÃO DE MATÉRIA PRIMA E GERAÇÃO DE RCD

Com o crescimento populacional, a permanência do elevado nível de consumo nos países industrializados e o aumento na demanda por bens materiais, principalmente em economias emergentes como China, Índia e Brasil, o consumo dos recursos cresceu oito vezes de 1900 a 2000, passando de 6 bilhões de toneladas para 49 bilhões de toneladas. Em 2011, foi estimado um consumo em até 59 bilhões de toneladas de recursos (PNUMA, 2011). O relatório publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente em 2011 estima que em 2050 a humanidade vá consumir em torno de 140 bilhões de toneladas de recursos, caso a taxa de crescimento econômico não seja desacoplada da taxa de consumo dos recursos naturais.

De acordo com Alavedra *et. al.* (1997), o setor da construção civil era responsável pelo consumo de 20 a 50% dos recursos naturais extraídos. Em 1999, Pinto observou que os RCD podiam corresponder a mais de 50% da massa dos resíduos sólidos municipais. Em 2001, a revista *Téchne* mostrou que as construtoras eram responsáveis pela geração de 20% a 25% dos resíduos de construção e as obras particulares correspondiam ao restante.

Em 2013, a Fundação Dom Cabral divulgou um relatório sobre a gestão da sustentabilidade na construção civil que mostrou que 75% de todos os recursos naturais e 44% da energia produzida no Brasil são consumidos pela construção civil. Além disso, o mesmo estima que de 35% a 40% de todos os resíduos gerados nas atividades humanas no Brasil advém deste setor, chegando a 500 quilos de RCD gerados por habitante anualmente.

Além dos dados estatísticos citados mostrarem o impacto gerado pela construção civil, sabe-se também que a excessiva demanda por recursos afeta a vida útil das jazidas. Após um determinado período, o recurso explorado, como a areia, se torna escasso e ocasiona a infertilidade de solos, erosões e desmatamento. A questão ambiental também estabelece limites técnicos e geográficos quanto à implantação de áreas para a exploração dos recursos e, desta forma, encarecem a produção devido ao transporte. (BASTOS FILHO, 2005).

O destino mais adotado para o RCD gerado pelas construtoras é o aterramento, sendo o mesmo aplicado sem nenhuma espécie de beneficiamento. De acordo com Lima (2005), essa prática pode ocasionar a contaminação do solo por lixiviação ou solubilização de certas substâncias nocivas presentes na composição do RCD, como materiais de pintura ou substâncias de tratamento de superfícies. Além destes materiais, estes resíduos podem conter amianto ou metais pesados, que mesmo em pequenas quantidades são altamente nocivos. As consequências da disposição dos resíduos de construção e demolição em aterros são abordadas também por Ângulo (2006). Segundo ele, esse destino é considerado perigoso por apresentar risco de contaminação devido à possível presença de ferro, manganês e materiais como plásticos, tintas, óleos, asfaltos, madeiras e por apresentar risco à saúde dos funcionários envolvidos nas atividades, da população no entorno e ao meio ambiente, além de possíveis incêndios com complexo tempo de extinção devido à contaminação por substâncias orgânicas, entre outros.

De acordo com Paliari et. al. (2002), o modo mais econômico de mitigar o impacto ocasionado pelo RCD é através da redução da perda. A adoção de técnicas para minimizar as perdas também ocasiona a diminuição da demanda por recursos naturais, e conseqüentemente, a diminuição do consumo de energia para sua extração e produção.

Sabe-se que ações isoladas não irão solucionar os problemas advindos por estes resíduos e a fim de minimizar tanto a saída de RCD como a entrada dos recursos não renováveis, a indústria deve tentar fechar seu ciclo produtivo (DORSTHORST; HENDRIKS, 2000).

2.5. PROCESSO DE RECICLAGEM DE RCD

O desenvolvimento da reciclagem busca continuamente uma melhoria na qualidade de vida do ponto de vista ambiental, reduzindo assim, os resíduos gerados pela atividade industrial. No meio empresarial iniciou-se a conscientização de que a geração de resíduos gera custos, pois são necessários seu tratamento e disposição em locais devidamente regulares e apropriados. Deste modo, atitudes para minimizar os impactos ambientais cada vez mais estão sendo adotadas por diversas indústrias, já que as tais proporcionaram redução dos gastos e o aumento da credibilidade perante o mercado consumidor (SILVA, 2005).

Além do retorno financeiro obtido pelos empresários, a reciclagem proporciona um retorno social devido seu alto potencial de geração de trabalho e renda. A mesma também contribui com a limpeza da cidade, amenizando o impacto nos terrenos baldios, rios, aterros sanitários e minimizando alagamentos e enchentes (www.abrecon.org.br, 2014).

A reciclagem dos rejeitos das indústrias e seu uso como insumos alternativos não é novidade e tem sido executado com êxito em diversos países (AHMED, 1996 apud COIMBRA et. al. 2004). Em países como os Estados Unidos, Japão, Dinamarca, Holanda, França, Itália, Inglaterra e Alemanha a reciclagem do RCD já se consolidou e existem diversas unidades instaladas (LIMA, 2005). Segundo Ângulo (2000), o processo de reciclagem deve ser adequadamente gerenciado já que é função de diversas variáveis como a tecnologia empregada, o tipo de resíduo e o uso desejado para o material reciclado, que podem torna-lo ainda mais impactante do que o resíduo original e ocasionar riscos ambientais.

Apesar dos avanços que vêm ocorrendo na construção civil, esse setor é fortemente influenciado pela questão cultural, de modo que a adoção de processos de racionalização não é um objetivo comum para as construtoras. Esse cenário faz com que a reciclagem se torne a principal solução para a redução dos resíduos gerados pelas construções e demolições, principalmente pelo fato da maior parcela dos resíduos gerados é formada por materiais potencialmente recicláveis (CARNEIRO, 2005). Outros autores como Zordan (1997) e Brito Filho (1999) afirmam que em torno de 70% do RCD gerado no Brasil encontra-se na Classe A que, de acordo com a resolução nº 307 do CONAMA, é formada pelos resíduos cuja reciclagem é obrigatória.

Além da questão cultural, outro complicador de uma efetiva eficiência do processo de reciclagem é a quantificação dos resíduos gerados no Brasil. De acordo com Pinto (1999), os geradores informais podem representar uma fonte significativa na geração do RCD, contudo não há dados estatísticos disponíveis que demonstrem esse quantitativo.

Nota-se que após a resolução nº 307 do CONAMA entrar em vigência, ocorreu um aumento na taxa de crescimento das usinas de reciclagem. Enquanto as usinas públicas são intermitentes devido às dificuldades administrativas, às mudanças de cenário político e ao pouco conhecimento técnico, as usinas privadas instaladas estão em

expansão, representando aproximadamente 45% das usinas brasileiras. Para os empresários o investimento em usinas é bastante interessante, já que possuem baixos custos e alta taxa de retorno (MIRANDA et al., 2009).

Foram realizadas avaliações econômicas por esses autores nas cidades de São Paulo, São Luís, Recife e Curitiba, as quais mostraram que uma usina com capacidade real de produção de 250 m³ por dia pode apresentar um custo total de investimento em torno de R\$ 650.000 e uma taxa de retorno mensal de aproximadamente 4,5%, caso seja atingida sua capacidade máxima de produção e sua comercialização (MIRANDA et al., 2009).

Entretanto, mesmo com as notáveis vantagens da reciclagem, se fosse considerado que todas as usinas nacionais em operação ou em construção estivessem reciclando RCD em sua capacidade nominal, estima-se que apenas 3,6% dos resíduos gerados estariam sendo reciclados. Isso mostra que para a reciclagem se tornar expressiva no Brasil, ainda é necessária a instalação de muitas usinas (MIRANDA et al., 2009).

As usinas brasileiras, de modo geral, possuem um processo de reciclagem bem semelhante e são compostas de equipamentos como pá carregadeira ou retroescavadeira, alimentador vibratório, transportadores de correia, britador de mandíbula ou impacto, separador magnético permanente ou eletroímã, e peneira vibratória. Esse modelo de usina de reciclagem foi baseado em usinas de mineração, porém apresenta peculiaridades devido às características dos resíduos que serão reciclados, como o fato do RCD normalmente conter materiais contaminantes que devem ser removidos por triagem manual ou processos mecanizados. Podem ser compostos ainda por cerâmicas, argamassas e concretos porosos que, dependendo da quantidade presente no RCD, pode afetar seu desempenho e comprometer sua utilização. Outra questão é o tipo de equipamento utilizado e a natureza dos resíduos, visto que eles podem também influenciar na viabilidade econômica da usina e nas propriedades do agregado reciclado, como na sua granulometria e lamelaridade (MIRANDA et al., 2009).

2.6. POLÍTICAS E INCENTIVOS ADOTADOS NO BRASIL E NO MUNDO

A sociedade está a cada dia mais exigente no que diz respeito à qualidade dos serviços que lhes são ofertados e ao meio ambiente. Diante desse cenário, o Estado e as empresas privadas devem adotar medidas que possibilitem o desenvolvimento com menor impacto ambiental possível.

Durante a ECO-92 e a definição da Agenda 21, foi observada a necessidade da implementação imediata de um adequado sistema de gestão ambiental para os resíduos sólidos (GÜNTHER, 2000). De acordo com Marques Neto (2009), a falta de recursos financeiros e de profissionais qualificados que identifiquem fontes geradoras e implantem ações de fiscalização são algumas das dificuldades encontradas para a implantação dos planos de gerenciamento de RCD.

Em 2002 foi aprovada a resolução nº 307 do CONAMA, na qual ficaram estabelecidos critérios e procedimentos para a gestão de RCD no Brasil. Essa resolução estabelece que as empresas privadas de construção devem desenvolver projetos de gerenciamento como a triagem em canteiros de obras, além do uso de transportadores cadastrados e de áreas licenciadas para manejo e reciclagem. Já o poder público deve oferecer uma rede de coleta e destinação adequada para os pequenos geradores que são incapazes de implantarem a autogestão.

Em 2004 foram elaboradas normas técnicas por Comitês técnicos e publicadas pela ABNT (Quadro 2), as quais representam importante instrumento para viabilizar o exercício da responsabilidade para os agentes públicos e os geradores de resíduos.

Quadro 2 - Normas técnicas elaboradas por Comitês técnicos.

| Norma | Nome |
|----------------|---|
| NBR 15112:2004 | Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. |
| NBR 15113:2004 | Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. |
| NBR 15114:2004 | Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. |
| NBR 15115:2004 | Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. |
| NBR 15116:2004 | Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. |

Fonte: ABNT (2004) - Adaptado.

Em 2010 foi aprovada a lei nº 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e contém instrumentos para permitir o avanço necessário ao país frente aos problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos

resíduos sólidos. A PNRS busca a redução na geração de resíduos, tendo como proposta o consumo sustentável e instrumentos que promovam o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos e uma destinação adequada dos rejeitos. Ele institui ainda a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos (fabricantes, distribuidores, comerciantes, o consumidor e responsáveis por serviços de manejo dos resíduos sólidos) na Logística Reversa dos resíduos.

Além disso, a partir da PNRS, os municípios foram pressionados a elaborarem seus Planos Municipais de Gestão de Resíduos. Nos municípios que já possuem o Plano de Gestão de Resíduos da Construção Civil, para obterem autorização para início das obras, as empresas que são classificadas como grandes geradores devem apresentar seus Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil.

Costa et al. (2007) realizou um estudo das variáveis que influenciam a implantação e o sucesso de programas de reciclagem de RCD em municípios brasileiros. De vinte variáveis estudadas, seis foram identificadas como as mais significativas, entre as quais estão: percentual dos funcionários de nível médio que trabalham na Prefeitura, renda média anual do município, percentual de domicílios com água, existência de programas de coleta seletiva de lixo, áreas de recepção de RCD e programas de incentivo para geração de trabalho e renda.

Para que a reciclagem se torne viável são necessários incentivos legais, fiscais e técnicos (BASTOS FILHO, 2005). Além dos incentivos dados pelo governo, os programas de certificação funcionam como um estímulo para a implantação de programas de reciclagem. O *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) e o *Leadership in Energy and Environmental Design Green Building Rating System* (LEED) são alguns dos programas de certificação edifícios que atendem uma porcentagem mínima de reciclagem (JOHN, 2000).

Nos Estados Unidos o governo federal estabeleceu uma política nacional para incentivar a compra de produtos e serviços que causem menos impacto ao meio ambiente durante seu ciclo de vida e quando comparados a sua concorrência (CLINTON 1993 apud JOHN, 2000).

Na Europa, a Agência Europeia do Ambiente, AEA, é responsável pelo controle de todos os resíduos gerados e pelo monitoramento dos dados estatísticos dos quinze

países membros da União Europeia. De acordo com dados da AEA, as atividades de demolição e construção são responsáveis pela maior geração de resíduos entre os países monitorados (31%), enquanto os resíduos municipais representam 12% dos mesmos (PEPE et al., 2014).

Em muitos países da União Europeia, como a Holanda e a Dinamarca, existem restrições ambientais para evitar o surgimento de novos aterros e há um forte incentivo à busca por destinos alternativos para o RCD gerado, sendo um deles a produção de agregados reciclados. Sabe-se que a Itália, a Dinamarca e a Holanda geram a mesma quantidade de RCD per capita, contudo, enquanto a Itália recicla apenas 10% desses resíduos, a Dinamarca e a Holanda reciclam e reusam mais de 90% (LEGAMBIENTE, 2011).

Com o objetivo de reduzir o uso de materiais naturais na construção e o impacto ambiental das indústrias de concreto, na Europa recentemente foi adotada uma política para promover o uso de agregados reciclados na produção de concreto. A Diretiva Europeia nº98/2008 incentiva os países membros a adotarem medidas que promovam o reuso de produtos e as atividades de reutilização, particularmente através da criação de instrumentos econômicos e critérios sobre propostas, metas quantitativas ou outras medidas. Ela ainda especifica um acréscimo de, pelo menos, 70% (em massa) dos procedimentos para a recuperação dos resíduos, como a reciclagem e a reutilização até 2020 (PEPE et al., 2014).

No Brasil, no âmbito Federal, a legislação brasileira está estruturada em diversos órgãos: Órgão superior (Conselho do Governo), Órgão Central (Secretaria do Meio Ambiente da Presidência da República), Órgão Consultivo Deliberativo (Conselho Nacional do Meio Ambiente), Órgão Executor (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA), Órgãos Seccionais Estaduais e Órgãos Locais. De acordo com a lei nº 8028 de 1990, o CONAMA é um órgão consultivo e deliberativo e entre seus deveres estão realizar assessorias, estudos e propostas ao conselho governamental e estabelecer políticas e diretrizes relativas ao meio ambiente e recursos naturais (SANTOS, 2008).

Analisando a legislação na esfera Estadual, pode-se citar o estado de Pernambuco. A lei nº. 12.008/2001 dispõe sobre a política de resíduos sólidos e suas providências para esse estado e tem como objetivo evitar o agravamento dos problemas dos resíduos sólidos,

estabelecer políticas governamentais para a gestão dos resíduos e ampliar o nível de informações existentes, relacionando a sociedade às questões de resíduos sólidos (SANTOS, 2008).

No âmbito Municipal, devem ser definidas políticas municipais para os resíduos da construção civil, incluindo o sistema de ponto de coleta (SIDUSCON CE, 2011). Conforme ficou determinado na lei nº 12.305/2010, os municípios deveriam adotar medidas visando à destinação adequada aos resíduos sólidos até o dia 2 de agosto de 2014, entre as quais se encontram o fechamento dos lixões a céu aberto e a implantação de aterros sanitários. Entretanto, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), apenas 2202 dos 5570 municípios brasileiros adotaram medidas adequadas. Uma semana antes do final do prazo estabelecido pela lei, uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional de Municípios (CNM) constatou que 32,5% das cidades com até 300 mil habitantes continuavam despejando seus resíduos em lixões. Os municípios com até 100 mil habitantes representavam 33,6% das cidades, enquanto as cidades entre 100 e 300 mil habitantes representavam 19,7% (TECHNE, 2014).

Algumas medidas estão sendo adotadas em alguns municípios brasileiros. Em Belo Horizonte, por exemplo, foi promulgada em 2012 a lei municipal nº 10.522 que instituiu o Sistema de Gestão Sustentável de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos (SGSRCC) e o Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos (PMRCC). Neste município foi estabelecido que obras com geração diária maior que 1m³ de resíduos são consideradas grandes geradoras (FUNDAÇÃO DOM CABRAL, 2013).

Em São Paulo, foi assinado um Termo de Ajustamento de Conduta em agosto de 2014 entre a Prefeitura de Araraquara e representantes de quinze empresas de coletas e transporte de resíduos sólidos. Esse termo implementará regras a todos os prestadores de serviço de coleta, entre as quais está a implementação de um sistema online, onde as empresas são obrigadas a registrar todos os dados do serviço. O objetivo desse termo é apurar os danos ambientais causados pelo descarte irregular de resíduos e está prevista multa de cinco mil reais por metro cúbico de material encontrado. Já existia na cidade a lei municipal nº 6.352/2005 para regularizar o descarte de caçambas, contudo a mesma não vinha sendo respeitada (www.globo.com, 2014).

Na cidade de São Paulo foi assinado o decreto de nº 4875/2006 que tornou obrigatório o uso nas obras e nos serviços de pavimentação de vias públicas da capital paulista de materiais provenientes da reciclagem de RCD. Uma importante iniciativa, pois prevê que as contratações de serviços de engenharia bem como os seus projetos, deverão contemplar o uso de materiais reciclados (PONTES, 2007).

Além das leis e decretos elaborados no Brasil, outros órgãos estão investindo e incentivando as práticas sustentáveis. Em 2013, foi divulgado que o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) concedeu R\$ 2,5 milhões não reembolsáveis para o desenvolvimento de pesquisas visando à produção de cimento à base de resíduos da construção civil. Os recursos financeiros do Fundo Tecnológico foram destinados ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) para uma operação que possui interveniência da *Intercement Brasil S/A*, empresa do Grupo Camargo Corrêa que forneceu equipe de profissionais especializados para execução do projeto. A pesquisa busca obter um cimento pozolânico a partir da reciclagem da fração fina do RCD (com diâmetro inferior a 0,15 mm), constituído de fragmentos de cimento hidratado e cerâmica vermelha. O resultado esperado é um material de baixo custo, alto potencial para exploração comercial, proporcionando menor emissão de poluentes, redução no consumo de recursos naturais e na geração de resíduos. Como possui resistência inferior a do cimento tradicional, é estudada sua aplicação no revestimento de pavimentos rígidos, em base estabilizada e em reaterro estabilizado de valas de água, esgoto e telefonia (<http://piniweb.pini.com.br/>, 2013).

Conclui-se, portanto, que apesar da atenção que se tem dado às questões relacionadas aos resíduos de construção e demolição no Brasil, a atual legislação é ainda pouco expressiva quando comparada com as vigentes em outros países (ANGULO et. al., 2004). Entretanto, após a implantação dos critérios e procedimentos estabelecidos pela resolução nº 307 do CONAMA (2002), a preocupação em minimizar os impactos ambientais e encontrar um destino adequado ao RCD, como a prática da reciclagem, está cada dia mais ganhando espaço (SANTOS, 2008).

2.7. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS

Os agregados reciclados de concreto são caracterizados pela alta absorção de água e perda das propriedades mecânicas quando comparados aos agregados naturais (YONG, 2009). Essas características podem ser explicadas pela alta porosidade das camadas exteriores das partículas, conhecidas como argamassa aderida. A argamassa aderida na

superfície dos grãos afeta as propriedades mecânicas e físicas dos agregados reciclados e por esse motivo, esses efeitos devem ser estudados e monitorados no preparo das misturas de argamassa ou concreto. O estudo pode ser realizado através da medição da capacidade de absorção de água na trabalhabilidade no estado fresco e nas propriedades mecânica no estado endurecido (MEFTEH, et al,2013). Entretanto, segundo alguns autores como Kwan et. al. (2011), o uso de agregados reciclados provenientes da parcela cinza apresenta um melhor desempenho que os agregados reciclados oriundos da parcela vermelha. Esse aumento poderia ser explicado pelas propriedades de “auto cimentação” do cimento desidratado das partículas de concreto britado e pela superfície mais rugosa que aumenta a fricção entre partículas, causando ainda redistribuição de tensões.

Os agregados reciclados de concreto são principalmente compostos de duas fases conhecidas como agregados antigos e argamassa antiga (ABBAS et. al., 2009). Conseqüentemente, o procedimento padrão para produção de um concreto convencional não poderá ser o mesmo de um composto de agregados reciclados. A substituição do agregado natural pelo reciclado resulta em uma diferente matriz no meso nível da estrutura do concreto, onde geralmente são consideradas três fases no concreto convencional: agregado natural, pasta e zona de transição interfacial (ZTI) (CAGGIANO, 2012). Nos concretos compostos de agregado reciclado podem estar presentes mais de três fases: agregado natural (se a substituição por agregado reciclado for parcial), agregado natural antigo, argamassa antiga, argamassa nova e diversos tipos de zonas de transição interfacial. Deste modo, podem ocorrer falhas nos concretos com agregado reciclado quando comparados aos convencionais devido aos diversos fatores críticos, como a existência de diferentes ZTI (XIAO, 2013).

O processo de produção e processamento utilizado na reciclagem do concreto e a sua transformação em partículas de agregado reciclado também influenciam as propriedades desses agregados e o desempenho do concreto produzido com os mesmos. Alguns procedimentos são adotados devido à falta de uma metodologia padrão para a reciclagem dos RCD, entre os quais estão: a remoção manual da fração não mineral, a moagem dos resíduos e o peneiramento dos agregados produzidos com a finalidade de separar a fração fina da grossa (LUZ, ALMEIDA, 2012).

Os agregados reciclados podem passar por alguns procedimentos de beneficiamento e adequação às características desejadas. Alguns desses processos são: a homogeneização, a moagem e peneiramento e a limpeza autógena. O processo de homogeneização do material tem como objetivo uniformizar os resíduos e remover materiais como madeira, aço, plásticos, entre outros. Inicialmente, os resíduos de construção e demolição são separados pela cor predominante: cinza ou vermelha. Em seguida, é realizado o quarteamento, onde o material é distribuído em diferentes camadas ao longo de um plástico e a partir da seção do meio, elas são divididas em várias seções denominadas células. O material é então encaminhado a um britador onde ocorre a moagem (PEPE et. al., 2014).

A moagem e o peneiramento visam à transformação dos resíduos em agregados com dimensões compatíveis às classes desejadas. Durante a moagem, o material é separado em duas classes: agregados finos e grossos. Posteriormente, é realizado o peneiramento, onde o material é classificado como brita 0, brita 1 ou areia (PEPE et. al., 2014).

A limpeza autógena consiste na colocação dos agregados reciclados em um moinho com tambor rotativo onde é imposta uma rotação. Através do atrito entre as partículas, a argamassa aderida no agregado é removida e não ocorre a fragmentação dos mesmos. Ela é mais interessante para agregados reciclados graúdos e busca remover a camada de argamassa aderida na superfície dos agregados e reduzir a heterogeneidade das partículas. Esse processo é pouco disseminado, contudo ele tem como objetivo melhorar a qualidade dos agregados reciclados e minimizar a diferença entre a performance do agregado reciclado e do natural (PEPE et. al., 2014).

Uma técnica utilizada na caracterização da morfologia dos agregados é a microscopia eletrônica por varredura. A figura 1 mostra os resultados obtidos por Pepe et. al. (2014) a respeito dos agregados naturais e reciclados. A densidade é observada pela diferença de cor na seção das partículas, onde os pontos mais escuros representam baixa densidade e os mais claros, alta densidade.

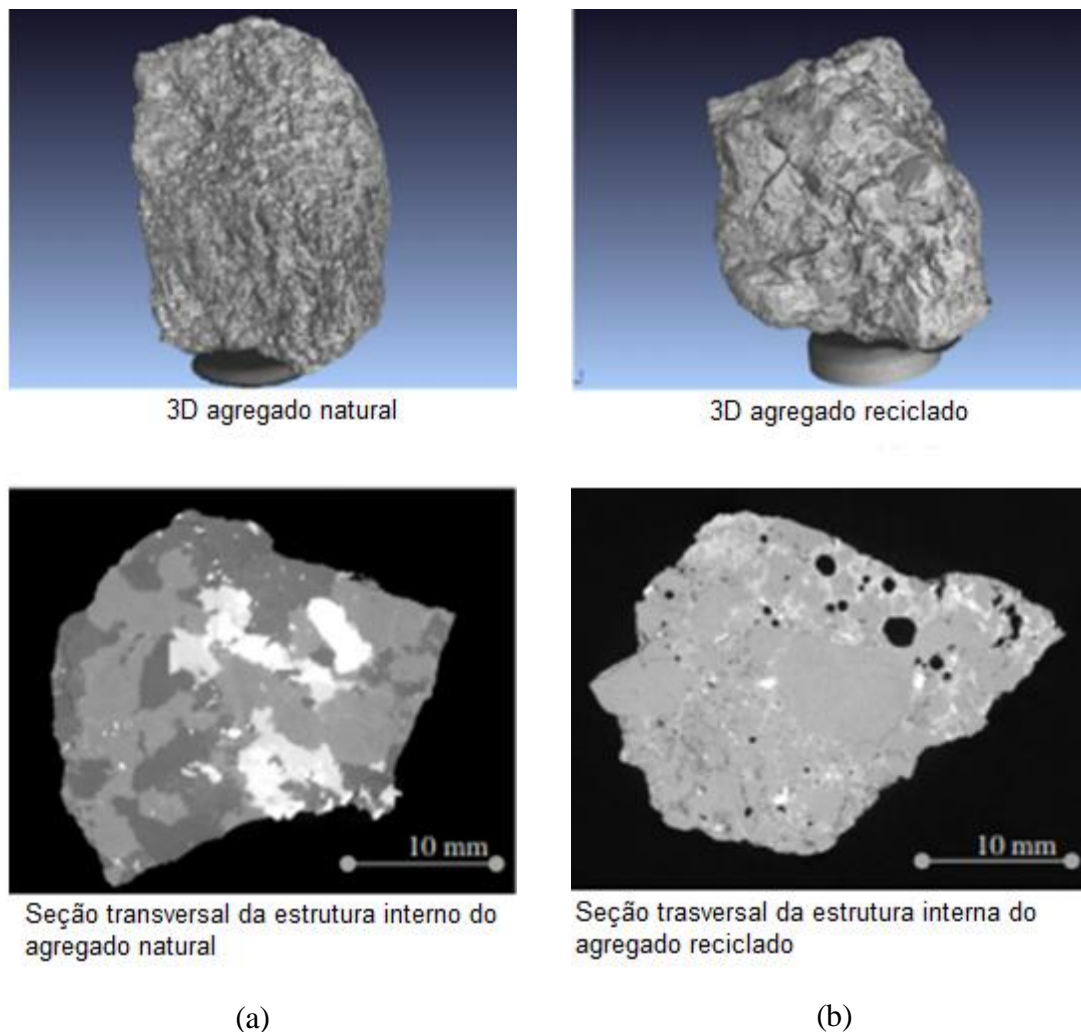


Figura 1- Análise visual dos agregados através de microscopia eletrônica por varredura. (a) Agregado Natural; (b) Agregado reciclado.

Fonte: Pepe et. al. (2014) – Adaptado.

De acordo com a figura 1, observa-se que os agregados reciclados apresentam uma maior porcentagem de pontos porosos e microfissuras causadas pela porosidade da antiga argamassa aderida nos antigos agregados naturais. O processo de produção e trituração dos agregados reciclados também pode contribuir para uma desintegração adicional e fragmentação interna. Pode-se notar também, que além de remover a argamassa aderida, esse processo modifica a forma final dos agregados reciclados. Desta forma, percebe-se que dependendo da quantidade de argamassa aderida no agregado reciclado, estes podem ter propriedades muito distintas às dos agregados naturais (PEPE et. al., 2014).

Além de melhorar as propriedades físicas e mecânicas, ao utilizar a limpeza autógena uma parcela significativa das camadas externas das partículas trituradas é efetivamente removida e transformada em partículas menores, resultando em um acréscimo na quantidade de partículas finas e em um melhor empacotamento das misturas com agregados reciclados (DE LARRARD, 1999). Consequentemente, nota-se uma melhoria nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos.

O tipo de dispositivos de moagem utilizados para quebrar os agregados maiores e o número de fases de processamento influenciam o tamanho e a forma dos agregados resultantes. Os processos de reciclagem normalmente utilizam os estágios primário e secundário de britagem. Britadores de mandíbulas, que são normalmente utilizados na fase de britagem primária, proporcionam a melhor distribuição granulométrica dos agregados reciclados para a produção de concreto. São obtidas geralmente partículas mais redondas e menos afiadas através da britagem secundária. Portanto, se o agregado reciclado se submeter somente a processo de britagem primária eles tendem a ser mais plano e afiado, conforme foi observado por alguns pesquisadores como Ferreira et. al. (2011) e Fonseca et. al. (2011). Britadores de cone são adequados como britadores secundários por eles normalmente permitem um tamanho máximo de alimentação de 200 milímetros e darem uma forma mais esférica ao agregado. Britadores de impacto, também utilizados para estágios de britagem secundárias, produzem agregados com uma boa distribuição granulométrica.

Hansen (1992) notou que ajustando a abertura do britador os agregados graúdos atendem uma faixa de tamanho adequada e desta forma é razoavelmente simples produzir agregados graúdos de boa qualidade. No entanto, segundo o ACI (2002), os agregados miúdos tendem a ficar mais grossos e mais angulares que qualquer areia convencional utilizada na produção de concreto. O aumento da angularidade e a redução da finura dos grãos são considerados as razões pela qual a trabalhabilidade do concreto produzido com esses materiais pode ser um problema.

A densidade dos agregados é uma propriedade de grande importância, visto que o método mais comum de classificar os agregados é de acordo com sua densidade, ou seja, em agregados leves, normais e pesados. Os agregados normais formam o maior grupo de agregados para concreto e incluem as areias naturais, cascalhos e britas. Normalmente os agregados reciclados também pertencem a este grupo, junto com

agregados manufaturados como escória de alto-forno refrigerado a ar e agregado reciclado de vidro (SILVA et. al., 2014).

Misturas de concreto com elevada resistência geralmente requerem um teor de cimento maior que, além de aumentar o empacotamento e produzir uma pasta de cimento mais resistente, resulta também em uma mistura menos porosa e por isso, pode-se esperar um possível aumento da densidade dos agregados reciclados. Contudo, alguns estudos como Dhir et. al. (1999) e Hasaba et. al. (1981) estabeleceram que os agregados reciclados provenientes de materiais de concreto com diferentes resistências à compressão e submetidos a mesmo processo de reciclagem apresentaram valores de densidade essencialmente semelhantes. Em outros estudos como Nagataki et. al. (2004) e Gokce et. al. (2011), os agregados reciclados oriundos de misturas de concreto de diferentes resistências resultaram em densidades distintas, onde a mesma reduziu de acordo com a redução das resistências. Desta forma, de acordo com Silva et. al. (2014), é razoável assumir que a resistência do concreto original tem algum efeito sobre a densidade do agregado resultante.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Cimento Portland

O cimento escolhido para a produção das argamassas foi o CPI-32 da empresa Cimento Vencemos do Amazonas Ltda. Essa escolha foi norteada por outras pesquisas realizadas no mesmo laboratório que fazem uso desse tipo de cimento. Deste modo, serão possíveis futuras comparações entre os resultados obtidos. A curva granulométrica do cimento CPI-32 está apresentada na figura 2.

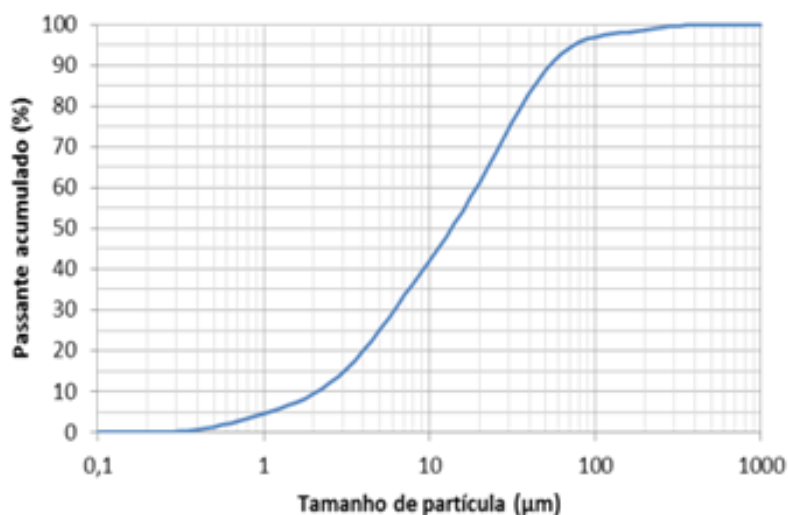


Figura 2- Curva granulométrica do CPI-32.

Fonte: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Laboratório de Materiais de Construção Civil/CT- Obras, Relatório de ensaio n° 997 823-203.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) realizou ensaios com o cimento e os resultados dos ensaios físicos, químicos e mecânicos estão apresentados nas tabelas 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios físicos do Cimento CPI-32

| Ensaio Físicos | Normas | Resultados | Limites da NBR - 5732/91 CPI (Classe 32) |
|---|---------------|-------------------|---|
| Finura - Resíduo na peneira de 0,075mm (%) | NBR 11579/91 | 0,2 | ≤ 12,0% |
| Água para pasta normal (% massa do cimento) | NBR NM 43/03 | 28,8 | - |
| Início de pega (h:min) | NBR NM 65/03 | 03:15 | ≥60 min (01 h) |
| Fim de pega (h:min) | NBR NM 65/03 | 04:15 | ≤ 600 min (10h) |
| Expansibilidade - frio (mm) | NBR 11582/91 | 0,0 | ≤ 5,0mm |
| Expansibilidade - quente (5h) (mm) | NBR 11582/91 | 0,0 | ≤ 5,0mm |
| Massa específica (kg/m ³) (IPT) | NBR NM 23/01 | 3140,00 | - |
| Finura - Método Blaine (m ² /kg) | NBR NM 76/98 | 375 | ≥260 |

Fonte: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Laboratório de Materiais de Construção Civil/CT- Obras, Relatório de ensaio n° 997 823-203.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios químicos do Cimento CPI-32

| Determinações | Resultados em % | Limites especificados em % (NBR 5732/91) |
|---|------------------------|---|
| Perda ao fogo (PF) | 1,59 | ≤ 2,0 |
| Anidrido silícico (SiO ₂) | 20,9 | - |
| Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) | 5,21 | - |
| Óxido férrico (Fe ₂ O ₃) | 4,15 | - |
| Óxido de cálcio (CaO) | 64,3 | - |
| Óxido de Magnésio (MgO) | 1,26 | ≤ 6,5 |
| Anidrido sulfúrico (SO ₃) | 2,81 | ≤ 4,0 |
| Óxido de sódio (Na ₂ O) | 0,09 | - |
| Óxido de potássio (K ₂ O) | 0,26 | - |
| Equivalente alcalino (em Na ₂ O)* | 0,26 | - |

| | | |
|--|---------------|-------|
| Sulfeto (S ²⁻) | Não detectado | - |
| Óxido de cálcio livre (CaO) | 2,41 | - |
| Resíduo insolúvel (RI) | 0,3 | ≤ 4,0 |
| Anidrido Carbônico (CO ₂) | 0,48 | ≤ 4,0 |
| Material carbonático (em CaCO ₃)** | 1,1 | 0 |

*Equivalente alcalino (em Na₂O) = %Na₂O + 0,658x%K₂O.

**Teor calculado estequiometricamente por meio do resultado de ensaio do anidrido carbônico (%CO₂ x2,27=CaCO₃).

Fonte: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Laboratório de Materiais de Construção Civil/CT- Obras, Relatório de ensaio n° 997 823-203.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios mecânicos do Cimento CPI-32

| Resistência à compressão (MPa) - NBR 7215/96 | | | | | | | |
|---|--------------------------|----------|----------|----------|--------------|------------|---------------------------------|
| Idades (dias) | Corpo de prova n° | | | | | DRM | Limites da NBR - 5732/91 |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | Média | (%) | CPI (Classe 32) |
| 3 | 31,8 | 31,5 | 32,1 | 32,0 | 31,9 | 1,3 | ≥10,0 MPa |
| 7 | 47,1 | 46,3 | 44,8 | 45,7 | 46,0 | 2,6 | ≥20,0 MPa |
| 28 | 56,6 | 57,1 | 54,5 | 56,3 | 56,1 | 2,9 | ≥32,0 MPa |

Fonte: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Laboratório de Materiais de Construção Civil/CT- Obras, Relatório de ensaio n° 997 823-203.

3.1.2. Água

Foi utilizada água deionizada na moldagem da argamassa e no processo de cura dos corpos de prova. A água foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro e em seguida sofreu o processo de remoção de íons presentes.

3.1.3. Agregado Natural

Foi utilizada a areia média lavada proveniente do leito do rio Guandu no estado do Rio de Janeiro (figura 3). A opção por esta areia ocorreu em virtude da disponibilidade da

mesma no laboratório e da sua utilização em outras pesquisas realizadas, possibilitando, assim, futuras comparações dos resultados.



Figura 3 - Rio Guandu- RJ.

Fonte: Google maps, 2012.

3.1.4. Agregado Reciclado

O agregado reciclado foi obtido através da britagem dos RCD proveniente da demolição da Ala Sul do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho no Rio de Janeiro (figura 4a).

A primeira etapa consistiu na separação dos resíduos cinza (resíduos de origem cimentícia) e dos resíduos vermelho (resíduos de natureza cerâmica). Na produção das argamassas foi utilizada a parcela cinza dos resíduos.

Foram feitas pilhas de homogeneização dos agregados, onde o material foi distribuído em camadas sobre uma membrana de plástico. Em seguida, essas camadas foram divididas em seções, de modo a possuir tamanhos homogêneos de partículas.

Após a conclusão da homogeneização dos resíduos, foi realizada a moagem através de um Reciclador de Resíduos da Construção Civil, conhecido como Queixada modelo 200 (figura 4b)



Figura 4 -a) RCD do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho b) Queixada 200.

Fonte: (a)www.oglobo.globo.com/rio, 2012.

O Queixada 200 é um britador móvel de mandíbulas alimentado manualmente, onde os RCD são triturados e em sequência separados em duas frações: grãos e miúdos. Caso a granulometria obtida no reciclador não seja a desejada, o material pode retornar e ser triturado novamente. Na pesquisa em questão utilizou-se a fração miúda dos resíduos e foi necessária a passagem do material pelo triturador apenas uma vez, atingindo assim a granulometria desejada.

3.2. MÉTODOS

Neste item são descritos os procedimentos e ensaios adotados para a determinação das propriedades físicas dos agregados e das propriedades físicas e mecânicas das amostras de argamassa.

3.2.1. Propriedades Físicas Dos Agregados

3.2.1.1. Massa Específica

A determinação da massa específica dos agregados foi realizada através do Picnômetro a gás AccuPyc II1340 (figura 5) no Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ.



Figura 5- Picnômetro a gás AccuPyc II1340.

Fonte: <http://micrometrix.com.br> (2014)

3.2.1.2. Análise Granulométrica

Os ensaios para determinação da distribuição granulométrica dos agregados foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ através da técnica do peneiramento mecânico a seco, de acordo com a Norma NBR NM 248/2003 – “Agregados - Determinação da Composição Granulométrica” (figura 6).



Figura 6 - Agitador mecânico de peneiras – Laboratório Tecnologia Mineral

Foi empregado um conjunto de peneiras com abertura entre 0,15 e 6,3 mm acopladas a um agitador mecânico. O ensaio foi efetuado com três amostras de 0,5 kg cada após estas passarem por homogeneização e por uma estufa à temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

De acordo com a NBR NM 248/2003, através desse ensaio é possível determinar a dimensão máxima característica dos agregados, ou seja, a abertura nominal da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Também é possível obter o módulo de finura dos agregados que corresponde a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal dividida por 100.

O tamanho de partícula abaixo do qual se encontra 80% da massa total do material (D_{80}) é um dos parâmetros utilizados para caracterizá-lo. Além do D_{80} , foram usados os tamanhos de partículas abaixo dos quais se situam 10%, 50% e 90% da massa total, ou seja, D_{10} , D_{50} e D_{90} , respectivamente. Outro parâmetro utilizado foi o coeficiente de não uniformidade (C_{nu}). Quanto maior o seu valor, maior será a faixa de grãos presentes e mais bem graduados é o material. Além disso, quando o coeficiente de não uniformidade é menor que 2, pode-se afirmar que o material apresenta uma granulometria uniforme (SOUZA PINTO, 1998, apud CORDEIRO 2006). A equação 1 apresenta o cálculo do coeficiente de não uniformidade.

$$C_{nu} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

D_{60} : tamanho abaixo do qual se encontra 60% da massa de material;

D_{10} : tamanho abaixo do qual se encontra 10% da massa de material.

3.2.2. Dosagem, Moldagem, Adensamento e Cura

Foram moldadas 12 misturas com três distintos traços e fator água/cimento e foram classificadas como argamassa rica, mediana e pobre. A argamassa rica possuía traço 1:2 e fator água/cimento de 0,45; a mediana possuía traço 1:4 e fator água/cimento de 0,68 e a pobre 1:6 e 1,05.

Para cada uma dessas classificações foram definidas diferentes porcentagens de substituição, baseadas no volume de cimento, do agregado natural (AGN) pelo reciclado (AGR): 0% (sem substituição do agregado natural), 15%, 25% e 50%. O Quadro 3

apresenta a classificação, a nomenclatura e a proporção dos agregados que foram adotados para as misturas de argamassa produzidas e serão citados nos resultados dos ensaios.

Quadro 3 - Classificação das misturas de argamassa

| Classificação | Nomenclatura | % Agregados |
|----------------------|---------------------|--------------------|
| Argamassa rica | M1 | 100% AGN |
| | M1-15% | 85% AGN + 15% AGR |
| | M1-25% | 75% AGN + 25% AGR |
| | M1-50% | 50% AGN + 50% AGR |
| Argamassa mediana | M2 | 100% AGN |
| | M2-15% | 85% AGN + 15% AGR |
| | M2-25% | 75% AGN + 25% AGR |
| | M2-50% | 50% AGN + 50% AGR |
| Argamassa pobre | M3 | 100% AGN |
| | M3-15% | 85% AGN + 15% AGR |
| | M3-25% | 75% AGN + 25% AGR |
| | M3-50% | 50% AGN + 50% AGR |

As argamassas foram produzidas de acordo com a NBR 7215/1996 – “Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão” que recomenda:

“Executar a mistura mecânica, colocando inicialmente na cuba toda a quantidade de água e adicionando o cimento. A mistura destes materiais deve ser feita com o misturador na velocidade baixa, durante 30 s. Após este tempo, e sem paralisar a operação de mistura, iniciar a colocação da areia, com o cuidado de que toda esta areia seja colocada gradualmente durante o tempo de 30 s. Imediatamente após o término da colocação da areia, mudar para a velocidade alta, misturando-se os materiais nesta velocidade durante 30 s. Após este tempo, desligar o misturador durante 1 min e 30 s. Nos primeiros 15 s, retirar, com auxílio de uma espátula, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá e que não foi suficientemente misturada, colocando-a no interior da cuba. Durante o tempo restante (1 min e 15 s), a argamassa deve ficar em repouso na cuba, coberta com pano limpo e úmido. Imediatamente após este intervalo,

ligar o misturador na velocidade alta, por mais 1 min. Deve ser registrada a hora em que o cimento é posto em contato com a água de mistura.”

Imediatamente após o amassamento, foi iniciada a moldagem dos corpos de prova. Utilizou-se moldes cilíndricos com dimensões de 50 x 100 mm previamente preparados de modo a garantir a estanqueidade. Foi realizada a colocação da argamassa no molde em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, onde cada uma recebeu 30 golpes uniformes homogeneamente distribuídos. Para cada camada foi realizado o adensamento através da mesa vibratória cuja velocidade de rotação é de 62 Hz em um intervalo de 1 min. Em seguida, os corpos de prova foram mantidos em um local isolado envolvidos por mantas umedecidas por um intervalo de 24 horas. Após esse período de cura, os corpos de prova foram desmoldados e encaminhados para a câmara úmida onde permaneceram até o momento da realização dos ensaios.

3.2.3. Propriedade no Estado Fresco

3.2.3.1. Consistência

A consistência das argamassas foi determinada após a realização da mistura e teve como base o anexo B da NBR 7215/1996. A figura 7 apresenta o espalhamento da mistura de referência da argamassa rica.

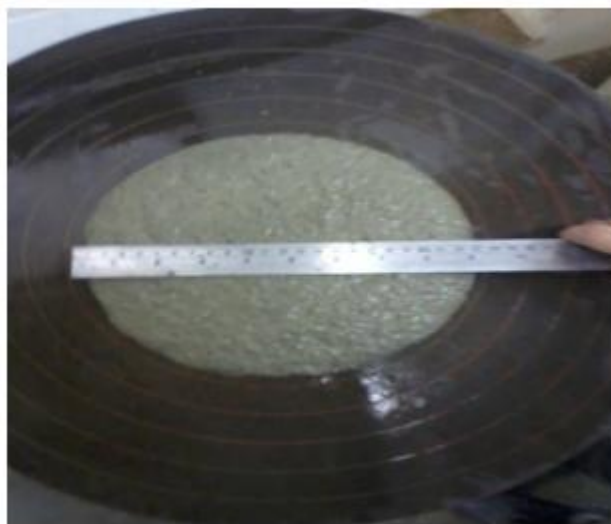


Figura 7- Espalhamento da mistura de referência da argamassa rica

A argamassa foi colocada dentro de um molde sobre uma mesa horizontal conhecida como *flowtable* em três camadas de mesma altura. Com um soquete normal aplicou-se

15, 10 e 5 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos na primeira, segunda e terceira camadas, respectivamente. O material que ultrapassou a borda superior foi removido e o topo foi arrasado com o auxílio de uma régua, de modo a não interferir na lubrificação da mesa. Após o enchimento, o molde foi retirado cuidadosamente e em seguida moveu-se a manivela existente no aparelho, fazendo com que a *flowtable* caísse 30 vezes em aproximadamente 30 segundos. O resultado desta operação foi o abatimento do tronco de cone da argamassa, possibilitando a medida da consistência por espalhamento. Segundo a NBR 7215/1996, o índice da consistência da argamassa é a média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais.

3.2.4. Propriedades Mecânicas

Tendo em vista a importância da resistência mecânica dos materiais na engenharia, é essencial a realização dos ensaios mecânicos visando os efeitos sobre seu comportamento mediante a adição de agregados reciclados. No presente trabalho foram calculados o módulo de elasticidade, a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

3.2.4.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 28 dias com o auxílio de cinco corpos de prova por mistura de dimensão 50 x 100 mm. Os corpos de prova foram retirados da câmara úmida no dia do ensaio e encaminhados ao faceamento em torno de usinagem. Após esse procedimento, de acordo com a NBR 7215/1996, ocorreu o rompimento das argamassas na prensa servocontrolada Shimadzu modelo UH-F1000Kni, sendo adotada uma velocidade de carregamento de 0,1 mm/min (figura 8a). Os deslocamentos longitudinais foram determinados mediante o uso de transdutores elétricos, os quais fornecerão o comportamento tensão versus deformação nos corpos de prova (figura 8b). A figura 8c apresenta os corpos de prova após o rompimento.



Figura 8- (a) Prensa servo-controlada Shimadzu UH-F1000kNI; (b) Transdutores elétricos no corpo de prova; (c) Corpos de prova após rompimento.

Conforme a NBR 8522/2008 – “Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão”, o módulo de elasticidade secante pode ser determinado através da equação 2.

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

E: módulo de elasticidade secante,

σ_1 : tensão correspondente à deformação de $5 \cdot 10^{-5}$,

σ_2 : tensão correspondente à 30% da tensão máxima,

ε_1 : deformação de $5 \cdot 10^{-5}$ e

ε_2 : deformação correspondente à tensão σ_2 .

3.2.4.2. Resistência à tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração tem uma grande importância por estar associada ao fenômeno da fissuração. As trincas e fissuras são fenômenos próprios e inevitáveis do concreto armado e que podem se manifestar em cada uma das três fases de sua vida: fase plástica, fase de endurecimento e fase de concreto endurecido (DNIT, 2006). Contudo, pode-se estimar quando as mesmas ocorrerão através da resistência à tração.

Uma vez que a medição experimental da tração uniaxial pura sem excentricidade apresenta inúmeras dificuldades, ensaios indiretos são empregados para a determinação da resistência à tração do concreto. O ensaio de compressão diametral apresenta-se como alternativa para se estimar a resistência à tração devido à facilidade de execução. O ensaio consiste, basicamente, na aplicação de um carregamento compressivo ao longo de duas geratrizes situadas em um mesmo plano diametral de um corpo-de-prova cilíndrico (estado plano de deformação) (CORDEIRO, 2006).

Os ensaios foram também executados em prensa Shimadzu com velocidade de 0,1 mm/min, segundo a NBR 7222/2011 – “Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”. Foram usados discos de 50 mm de diâmetro e 25 ± 1 mm de altura que foram posicionados na prensa com auxílio de mordentes de aço. Os discos foram obtidos através do corte dos corpos de prova cilíndricos na região central, totalizando 15 discos para a realização do ensaio. A figura 9 apresenta o posicionamento na prensa (figura 9a), um disco no momento do rompimento (figura 9b) e alguns discos após o rompimento (figura 9c).

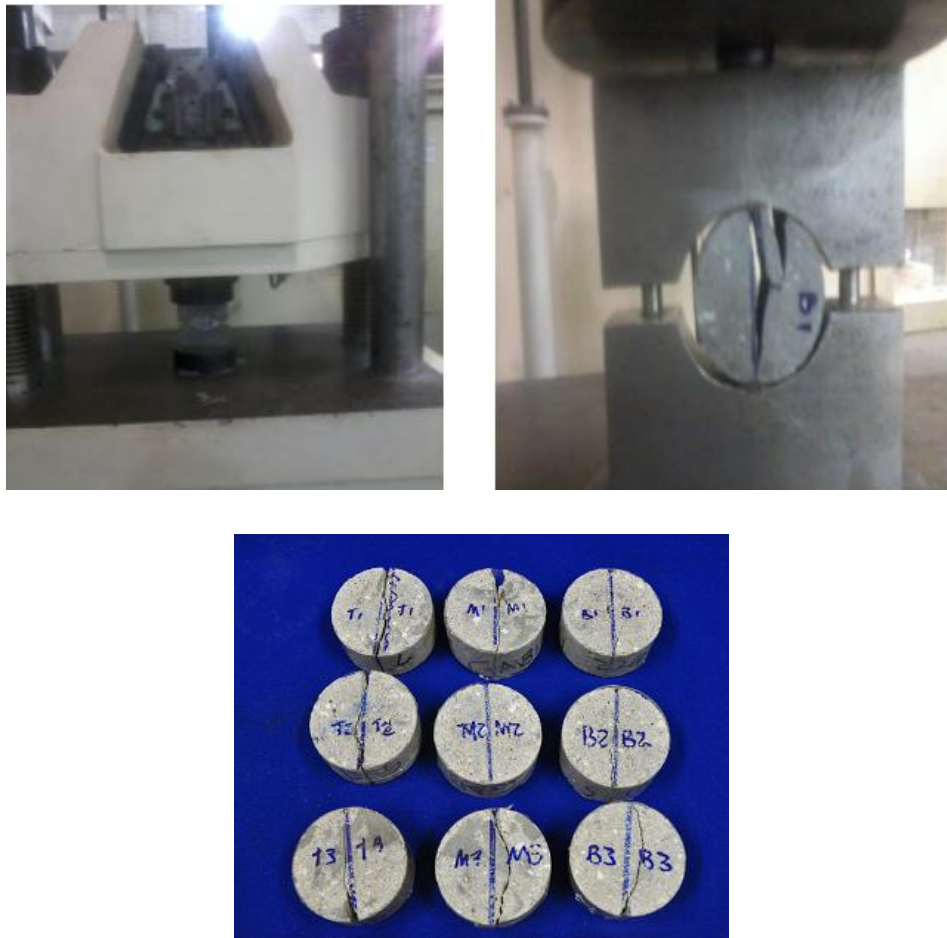


Figura 9- (a) Prensa servo-controlada Shimadzu UH-F1000kNI; (b) Momento da ruptura de um disco; (c) Discos após ruptura.

Segundo Cordeiro (2006), as tensões de tração e compressão podem ser calculadas pela solução elástica para carregamento uniforme em arcos finitos de disco e do critério de ruptura de Griffith que são apresentadas nas equações 3 e 4, respectivamente.

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot F_r}{D \cdot L \cdot \pi} \quad (\text{eq. 3})$$

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot F_r}{D \cdot L \cdot \pi} \left(\frac{D^2}{r \cdot (D-r)} - 1 \right) \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

σ_t : resistência à tração por compressão diametral;

σ_c : Tensão de compressão;

F_r : Carga de ruptura;

D: diâmetro do corpo-de-prova;

r: distância do elemento ao prato superior da prensa;

L: espessura do corpo-de-prova.

3.2.5. Propriedades Físicas

Segundo o *American Concrete Institute*, define-se durabilidade a habilidade de resistir aos ataques químicos, abrasão, ações climáticas e quaisquer processos de deterioração (ACI 201.2R-01, 2002 apud CORDEIRO, 2006). Esses processos de deterioração estão associados aos poros existentes na argamassa e seu comportamento na presença da água.

Para avaliar a durabilidade das argamassas confeccionadas com agregados provenientes de RCD, foram realizados os ensaios de absorção total e absorção por capilaridade. No ensaio de absorção total, foram medidos os poros conectáveis e os não conectáveis. Já no ensaio de absorção por capilaridade, os poros medidos foram apenas os conectáveis.

Ambos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ. Após atingir os 28 dias, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e encaminhados para uma estufa à temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ com ventilação interna até constância de massa. Ao invés de uma temperatura de secagem de 105°C , como é sugerido nas normas, optou-se por essa temperatura a fim de manter a integridade dos produtos de hidratação do cimento Portland.

3.2.5.1. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade (figura 10) foi realizado em corpos de prova cilíndricos, conforme a norma NBR 9779/2012 – “Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade”, com a finalidade de obter o acréscimo de massa de água em função do tempo. Foram utilizados cinco corpos de prova de dimensões 50 x 100 mm por mistura e foi realizada uma selagem lateral com fita de alumínio para garantir o fluxo unidirecional e evitar a perda de umidade.

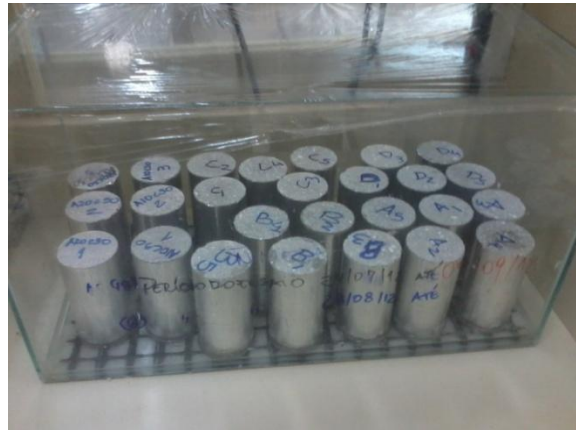


Figura 10 - Ensaio de absorção por capilaridade

A absorvidade é a capacidade de absorção de água em uma única direção e ela se apresenta como uma propriedade adequada para avaliar a durabilidade dos materiais a base de cimento. Quando um material possui valores baixos de absorvidade pode-se dizer que possui uma melhor qualidade (GONÇALVES, 2005). No ensaio de absorção por capilaridade, foi possível obtê-la em dois estágios distintos. O primeiro ocorre nos poros capilares médios e é caracterizado pelo comportamento linear do acréscimo de massa aparente de água em relação à raiz quadrada do tempo (S1), diferente do segundo estágio, onde o acréscimo segue um comportamento não linear. Esse segundo estágio (S2) é conhecido como período de saturação e ocorre em poros capilares pequenos. O ponto onde ocorre a mudança do estágio de absorção para o de saturação é chamado de ponto de transição (Pt) (FONTES, 2008). Esse fenômeno pode ser observado na figura 11.

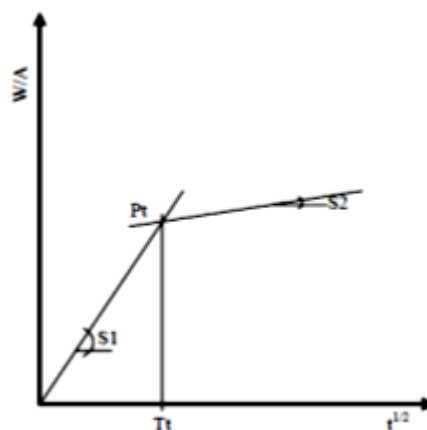


Figura 11 – Gráfico típico do acréscimo de massa aparente em função da raiz quadrada do tempo.

Fonte: FONTES, 2008.

Os corpos de prova foram inseridos num recipiente sobre suportes e o mesmo foi preenchido com água até que o nível d'água permanecesse constante a 5 ± 1 mm acima da sua face inferior. Em seguida, foi determinada a massa dos corpos de prova com 3, 6, 24, 48 e 72 horas contadas a partir da colocação dos mesmos em contato com a água. O ensaio foi conduzido por um período médio de 720 horas para todas as misturas.

De acordo com a NBR 9779/2012, a absorção de água por capilaridade é calculada pela razão entre o aumento da massa e a área da seção transversal da superfície do corpo de prova em contato com a água (equação 5).

$$A_c = \frac{m_c - m_s}{S} \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:

M_c : massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado,

M_s : massa do corpo de prova seco em estufa,

S : área da seção transversal do corpo de prova.

3.2.5.2. Absorção por imersão

O ensaio de absorção por imersão foi realizado em discos com dimensões de 50 mm de diâmetro e $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de altura, segundo a NBR 9778/2005 – “Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica”. Esses discos foram obtidos pelo corte dos corpos de prova cilíndricos na região central, resultando em 3 discos para cada, totalizando 15 discos para o ensaio. O objetivo do ensaio é obter a absorção de água, o índice de vazios e a massa específica da argamassa para todas as misturas.

Após saírem da estufa, as amostras foram pesadas e imersas em água à temperatura de $23^\circ \pm 2^\circ \text{ C}$ onde permaneceram por 72 horas. Completada essa etapa de saturação, as amostras foram postas em um recipiente cheio de água que foi levado progressivamente à ebulição. A ebulição foi mantida durante um período de 5 horas e em seguida deixou-se a água esfriar naturalmente até a temperatura de $23^\circ \pm 2^\circ \text{ C}$ (figura 12a).

Finalmente, foram determinadas a massa dos corpos de prova secos e a massa dos mesmos saturados com o auxílio de uma balança hidrostática (figura 12b). Com tais massas, foram obtidos a absorção (A_i), o índice de vazios (I_v) e a massa específica (δ) das argamassas através das equações 6,7 e 8, respectivamente.

$$A_i = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (\text{eq. 6})$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad (\text{eq. 7})$$

$$\delta = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (\text{eq. 8})$$

Onde:

M_{sat} : massa do corpo de prova saturado em água,

M_s : massa do corpo de prova seco em estufa,

M_i : massa do corpo de prova saturado e imerso em água.



Figura 12 - (a) Amostras esfriando após ebulição; (b) Balança hidrostática

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados das propriedades descritas no capítulo 3: granulometria, massa específica dos agregados, trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção por capilaridade, índice de vazios, absorção de água e massa específica das argamassas.

4.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

4.1.1. Agregado Natural

A curva granulométrica do agregado natural está representada na figura 13 e os parâmetros citados no capítulo anterior estão apresentados na tabela 4.

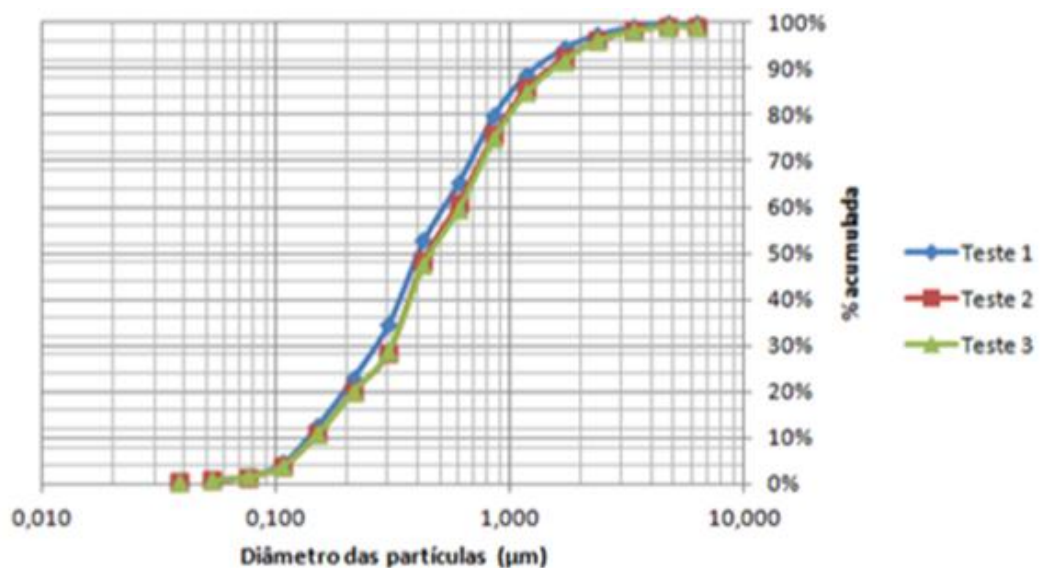


Figura 13- Curva granulométrica do agregado natural

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Tabela 4- Parâmetros granulométricos do agregado natural

| Propriedades | Resultado | Unidade |
|-----------------|-----------|---------|
| Mod. FN: | 2,55 | - |
| ϕ máx.: | 4,80 | mm |
| C_{nu} | 3,90 | - |
| D ₁₀ | 0,15 | mm |
| D ₅₀ | 0,43 | mm |
| D ₈₀ | 0,99 | mm |
| D ₉₀ | 1,54 | mm |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

4.1.2. Agregado Reciclado

A curva granulométrica do agregado reciclado está representada na figura 14 e os parâmetros estão apresentados na tabela 5.

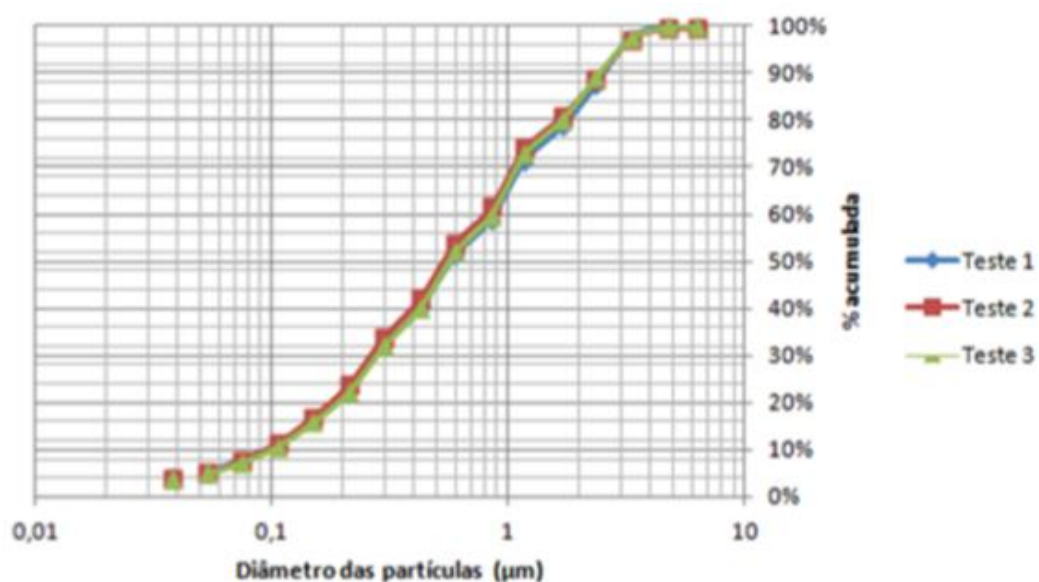


Figura 14- Curva granulométrica do agregado reciclado

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Tabela 5 - Parâmetros granulométricos do agregado reciclado

| Propriedades | Resultado | Unidade |
|--------------|-----------|---------|
| Mod. FN: | 2,89 | - |
| ϕ máx.: | 4,80 | mm |
| C_{nu} | 8,00 | - |
| D_{10} | 0,90 | mm |
| D_{50} | 0,57 | mm |
| D_{80} | 1,73 | mm |
| D_{90} | 2,55 | mm |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

4.1.3. Comparação dos Resultados do Agregado Natural com o Reciclado

A figura 15 apresenta a comparação das curvas granulométricas do agregado natural com o reciclado e a tabela 6 apresenta a comparação dos seus parâmetros.

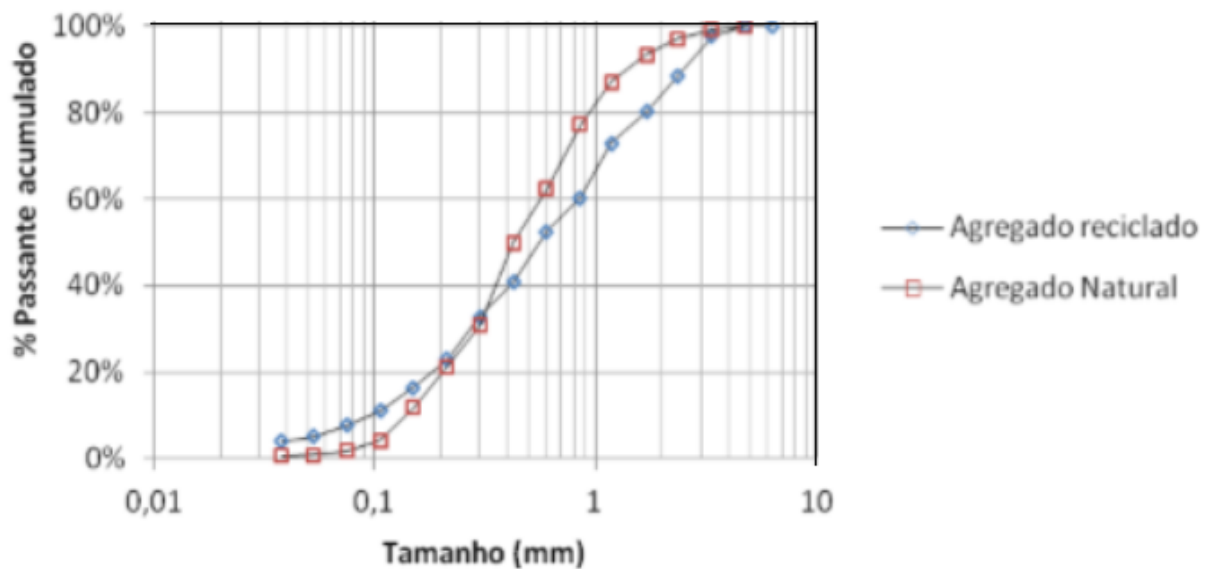


Figura 15- Curva granulométrica do agregado reciclado

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Tabela 6 - Comparação dos parâmetros granulométricos do agregado natural com do reciclado

| Propriedades | Agregado natural | Agregado reciclado | Unidade |
|---------------------|-------------------------|---------------------------|----------------|
| Mod. FN: | 2,55 | 2,89 | - |
| ϕ máx.: | 4,80 | 4,80 | mm |
| C_{nu} | 3,90 | 8,00 | - |
| D_{10} | 0,15 | 0,90 | mm |
| D_{50} | 0,43 | 0,57 | mm |
| D_{80} | 0,99 | 1,73 | mm |
| D_{90} | 1,54 | 2,55 | mm |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Percebe-se que até aproximadamente 0,30 mm o agregado reciclado apresenta mais grãos finos que o natural, contudo a partir deste tamanho nota-se a presença de grãos mais grossos no mesmo. Nota-se também que o módulo de finura do agregado reciclado é ligeiramente superior ao do natural, o que o torna mais grosso que o natural. De acordo com as curvas granulométricas, esse resultado apresenta-se coerente.

Como esperada, a dimensão máxima característica de ambos os agregados é equivalente, o que ocasiona menos influência nos ensaios posteriores. Além disso, o agregado reciclado é mais bem graduado que o natural, visto que apresenta coeficiente de não uniformidade superior. Este resultado também está de acordo com as curvas granulométricas e pode exercer uma influência positiva nos resultados que serão apresentados posteriormente.

4.2. MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS

Os resultados do ensaio de massa específica dos agregados estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Massa específica dos agregados

| Material | Massa específica (g/cm³) |
|--------------------|--|
| Agregado natural | 2,67 |
| Agregado reciclado | 2,45 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Nota-se que o agregado reciclado apresenta massa específica um pouco inferior ao agregado natural e por esse motivo espera-se que a massa específica da argamassa reciclada seja inferior a da argamassa convencional.

De acordo com Kikuchi (1993), é esperado que ocorra uma redução gradual da massa específica da argamassa à medida que aumenta o teor de substituição do agregado natural pelo reciclado. Além disso, ocorre um acréscimo do teor de ar com o aumento do teor de substituição, o que contribui para a redução da massa específica.

4.3. TRABALHABILIDADE

Para o estudo da trabalhabilidade foi realizado o ensaio de consistência por espalhamento. Para viabilizar a substituição do agregado natural pelo reciclado, buscou-se atribuir à argamassa produzida com agregado reciclado um comportamento semelhante ao da argamassa com agregado natural. Para isso, é esperado que os valores do espalhamento das misturas com diferentes teores de substituição sejam equivalentes ou próximos aos valores de referência.

A comparação entre os resultados obtidos para a trabalhabilidade das diferentes misturas foi realizada por uma análise de variância (ANOVA) com nível de confiança de 95% através do programa Oringin Pro 8. Utilizou-se o teste de Tukey para comparar as médias das misturas com substituição e da mistura de referência e, deste modo, verificar se ocorreu alteração significativa na propriedade.

4.3.1. Misturas de Argamassa Rica

Os resultados obtidos para as misturas de argamassa rica encontram-se na tabela 8 e na figura 16.

Tabela 8- Espalhamento das misturas de argamassa rica

| Traço 1:2 -0,45 | Espalhamento (cm) | DP |
|------------------------|--------------------------|-----------|
| M1 | 24,0 | 0,38 |
| M1-15% | 23,4 | 0,23 |
| M1-25% | 23,8 | 0,29 |
| M1-50% | 23,9 | 0,35 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

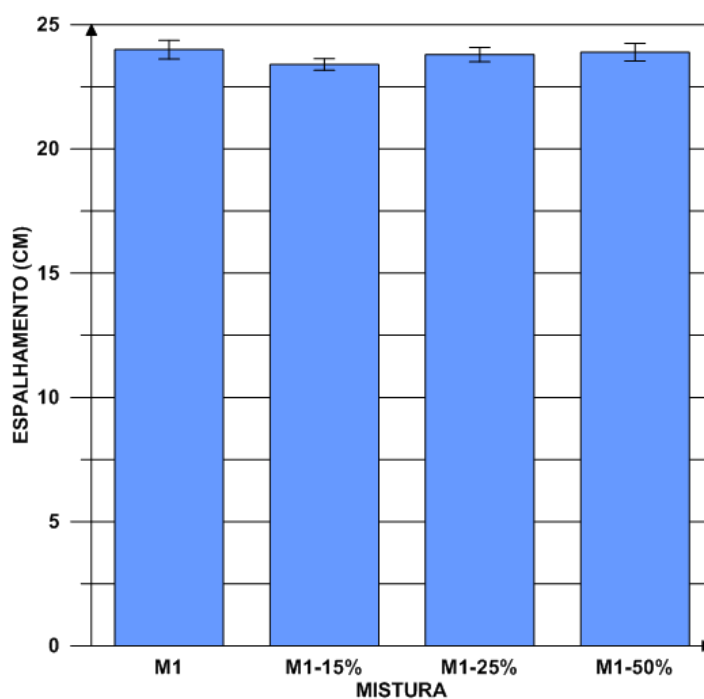


Figura 16 - Espalhamento das misturas de argamassa rica

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Observou-se uma redução do espalhamento de 2,5%; 0,8% e 0,4%, para as misturas M1-15%, M1-25% e M1-50%, respectivamente. De acordo com a análise estatística, a única mistura que apresentou diferença significativa no espalhamento quando comparada com a referência foi a M1-15%.

Na figura 17 encontra-se o espalhamento das quatro misturas de argamassa rica.

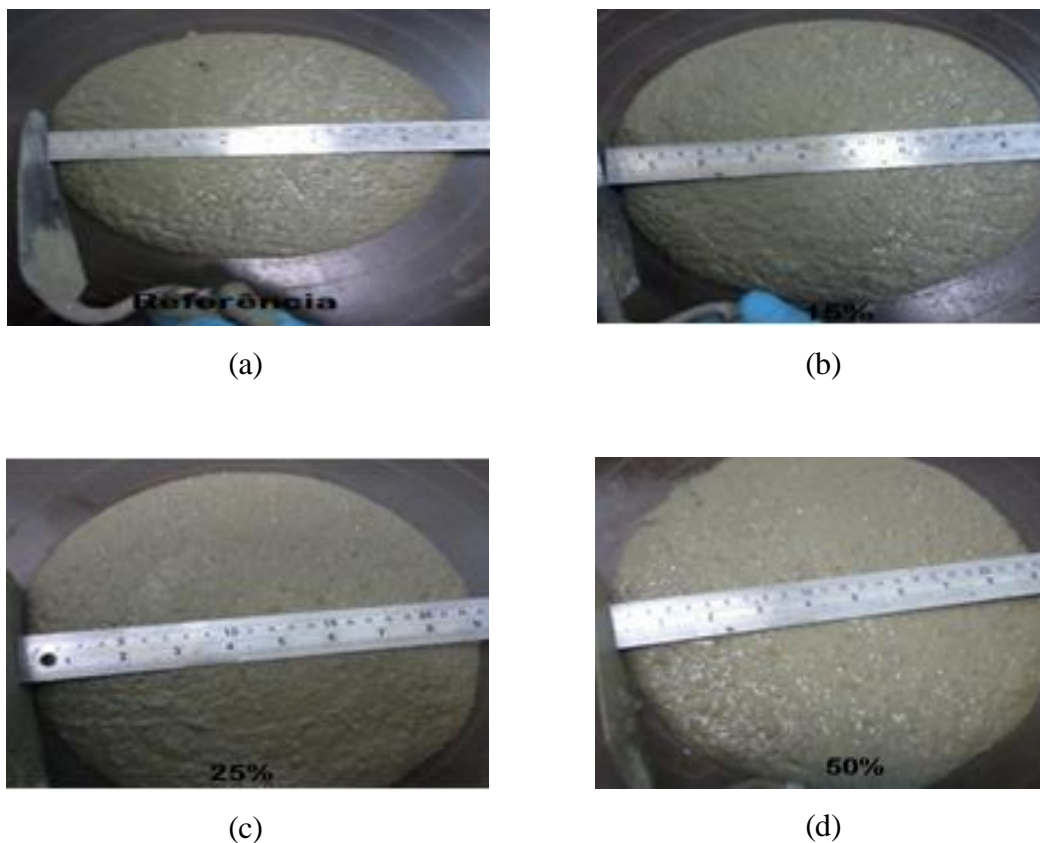


Figura 17 – Espalhamento das misturas com diferentes teores de substituição da argamassa rica. – (a) M1, (b) M1-15%, (c) M1-25%, (d) M1-50%

É fundamental observar a aparência das misturas no espalhamento, visto que características como a exsudação, a segregação e a trabalhabilidade das misturas podem ser obtidas visualmente. Pode-se notar pela figura 17 que não ocorreu segregação e exsudação em nenhuma das quatro misturas. Percebe-se também que as misturas apresentaram boa trabalhabilidade e não houve necessidade de adicionar superplastificante às misturas. Portanto, pode-se afirmar que as misturas com agregado reciclado apresentaram resultados positivos do ponto de vista da análise visual do espalhamento.

4.3.2. Misturas de Argamassa Mediana

Os resultados obtidos para as misturas de argamassa mediana encontram-se na tabela 9 e na figura 18.

Tabela 9 - Espalhamento das misturas de argamassa mediana

| Traço 1:4 - 0,68 | Espalhamento (cm) | DP |
|------------------|-------------------|------|
| M2 | 17,6 | 0,42 |
| M2-15% | 19,8 | 0,60 |
| M2-25% | 19,3 | 0,46 |
| M2-50% | 20,3 | 0,60 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

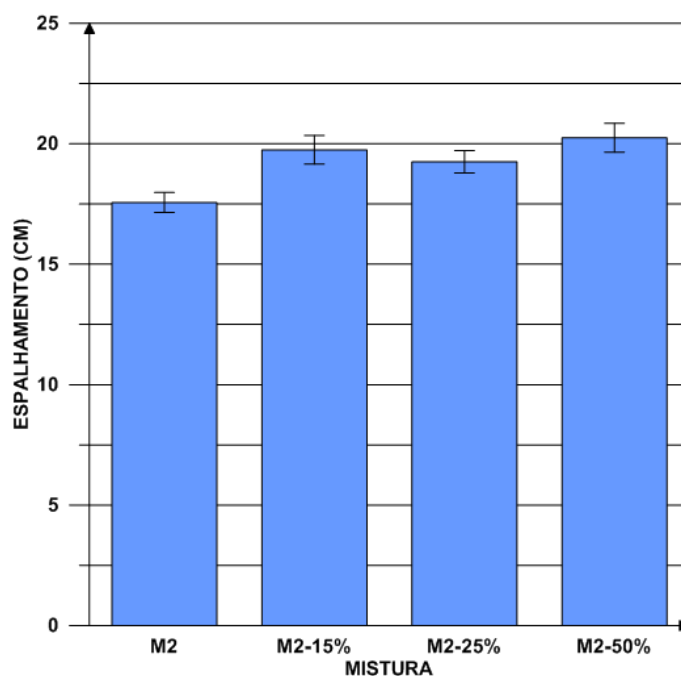


Figura 18 - Espalhamento das misturas de argamassa mediana

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Nas misturas de argamassa mediana, observou-se um aumento do espalhamento de 12,5%; 9,7% e 15,3% em relação a mistura de referência, para as misturas com 15%, 25% e 50% de substituição, respectivamente. De acordo com a análise estatística, todas as misturas apresentaram uma diferença significativa no espalhamento quando comparada com a referência. Como ocorreu um acréscimo no valor da trabalhabilidade para as argamassas com agregado reciclado, pode-se concluir que o resultado foi positivo.

Na figura 19 encontra-se o espalhamento das misturas de argamassa mediana.

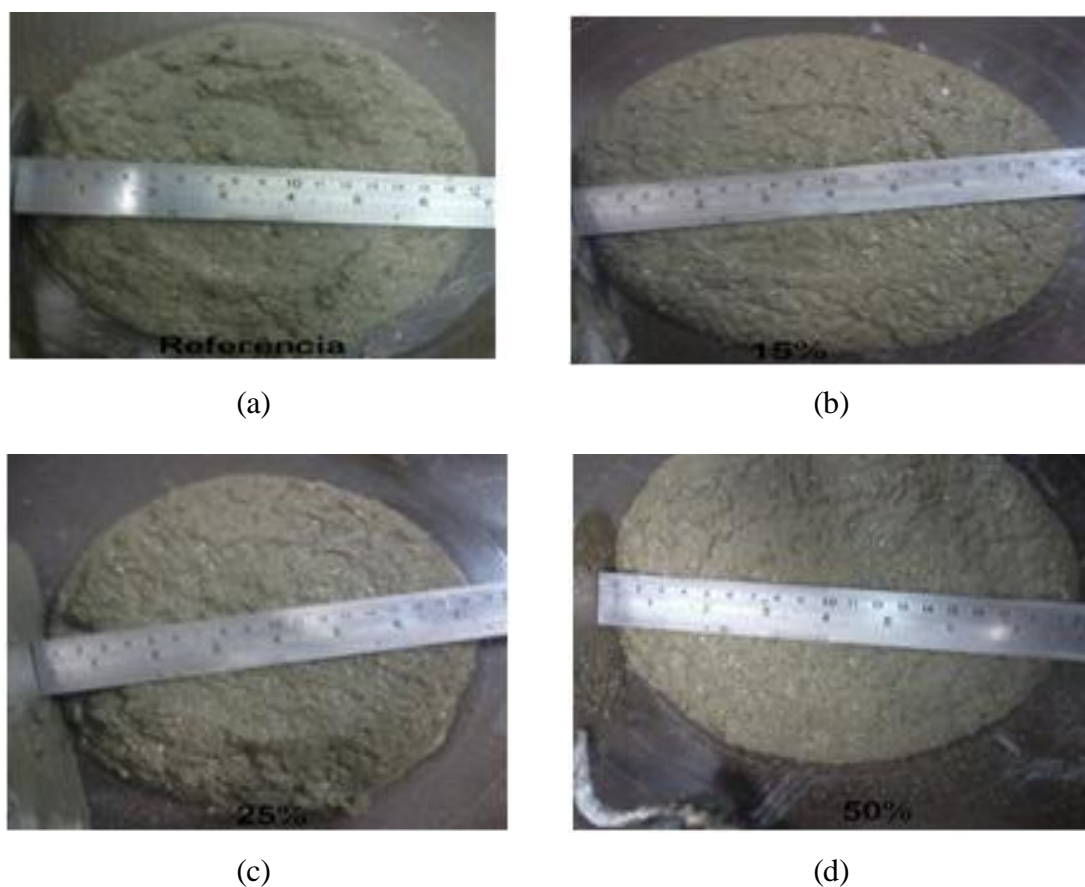


Figura 19 – Espalhamento das misturas com diferentes teores de substituição da argamassa mediana. – (a) M2, (b) M2-15%, (c) M2-25%,(d) M2-50%

Pode-se observar pela figura 19 que não ocorreu segregação e exsudação em nenhuma das quatro misturas de argamassa mediana. Percebe-se também que ocorreu uma melhora na trabalhabilidade das misturas com agregado reciclado sem adição de superplastificante. Portanto, pode-se afirmar que as misturas de argamassa mediana com agregado reciclado também apresentaram resultados positivos do ponto de vista da análise visual do espalhamento.

4.3.3. Misturas de Argamassa Pobre

Os resultados obtidos para as misturas de argamassa pobre encontram-se na tabela 10 e na figura 20.

Tabela 10 - Espalhamento das misturas de argamassa pobre

| Traço 1:6 - 1,05 | Espalhamento (cm) | DP |
|-------------------------|--------------------------|-----------|
| M3 | 20,9 | 1,09 |
| M3-15% | 21,8 | 1,13 |
| M3-25% | 23,4 | 0,74 |
| M3-50% | 23,8 | 0,80 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

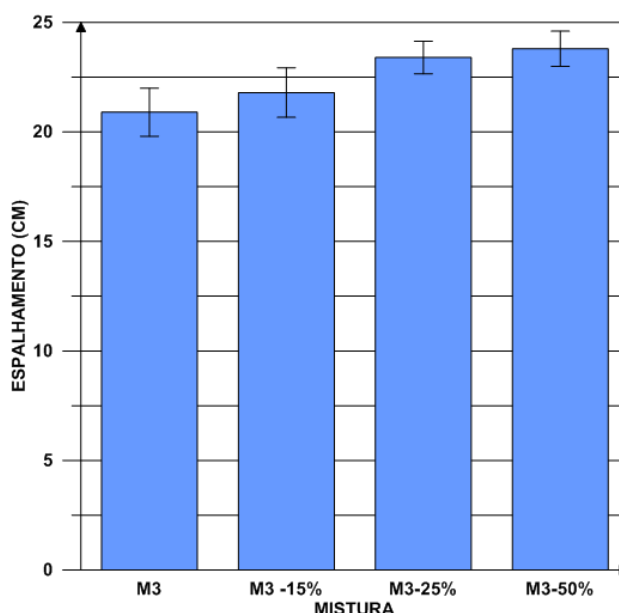


Figura 20 - Espalhamento das misturas de argamassa pobre

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Observou-se que nas misturas de argamassa pobre ocorreu um aumento do espalhamento de 4,3%; 12,0% e 13,9% em relação à mistura de referência, para as misturas com 15%, 25% e 50% de substituição, respectivamente. Baseado na análise estatística, a mistura M3-15% não apresentou uma diferença significativa no espalhamento quando comparada com a referência, porém as misturas M3-25% e M3-50% apresentaram.

Na figura 21 encontra-se apresentado o espalhamento das misturas de argamassa pobre.

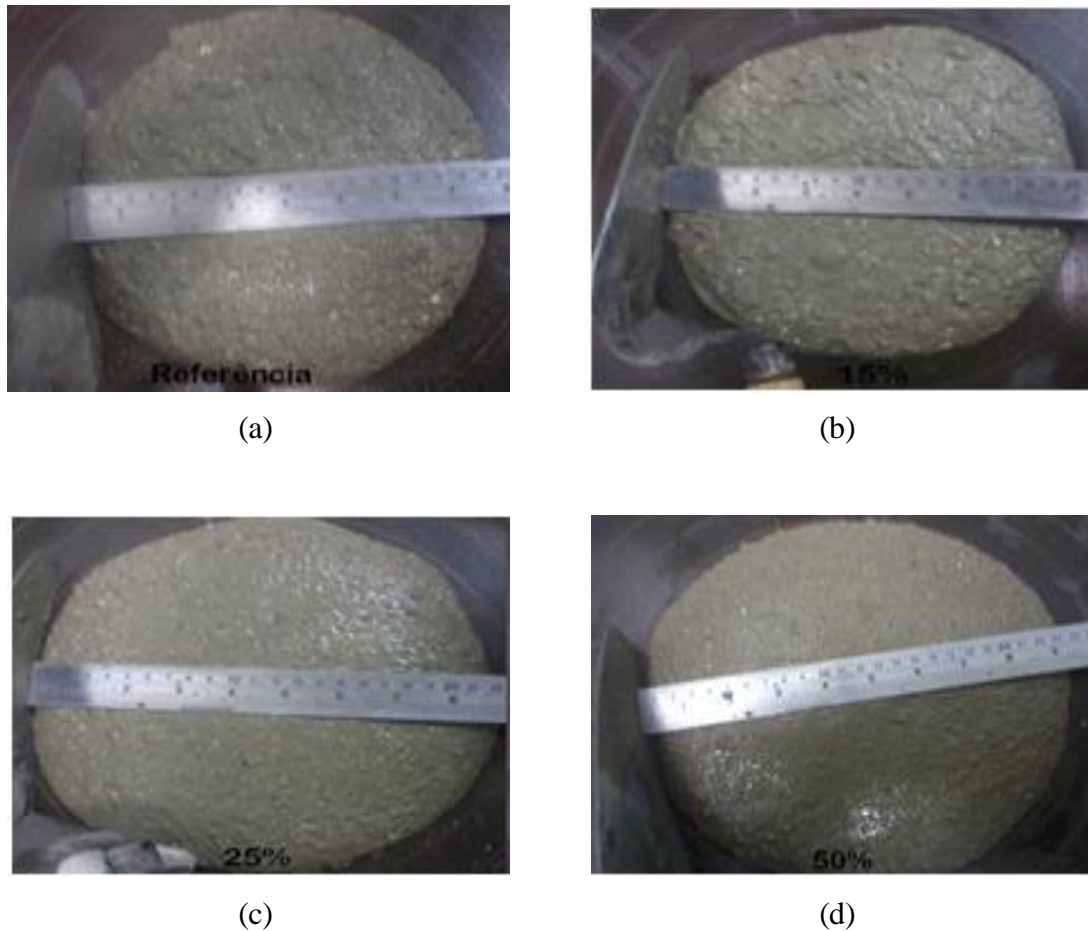


Figura 21 – Espalhamento das misturas com diferentes teores de substituição da argamassa pobre. – (a) M3, (b) M3-15%, (c) M3-25%, (d) M3-50%

Pode-se observar na figura 21 que as misturas de argamassa pobre não apresentaram segregação e exsudação. Semelhante ao ocorrido nas misturas de argamassa mediana, ao adicionar agregado reciclado nas misturas de argamassa pobre houve uma melhora na trabalhabilidade. Portanto, conclui-se que as misturas de argamassa pobre com agregado reciclado apresentaram resultados positivos do ponto de vista da análise visual do espalhamento.

4.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS

A determinação das resistências à compressão e à tração por compressão diametral e o cálculo do módulo de elasticidade foram realizados aos 28 dias de acordo com os procedimentos descritos no 3.2.4.

A comparação entre os resultados obtidos para as propriedades mecânicas das diferentes misturas foi realizada por uma análise de variância (ANOVA) com nível de confiança

de 95% através do programa Oringin Pro 8. Utilizou-se o teste de Tukey para comparar as médias das misturas com substituição e da mistura de referência e, deste modo, verificar se ocorreu alteração significativa na propriedade.

4.4.1. Ensaio de Resistência à Compressão Axial

No ensaio de resistência à compressão axial espera-se que as misturas produzidas com agregado reciclado não apresentem significativa perda de resistência à compressão quando comparadas às misturas com agregado natural.

4.4.1.1. Misturas de argamassa rica

As curvas tensão x deformação características dos corpos de prova das diferentes misturas de argamassa rica foram traçadas e a curva correspondente a um deles encontra-se apresentada na figura 22. Não foram considerados os resultados da mistura M1-25% devido a problemas na obtenção de dados no ensaio.

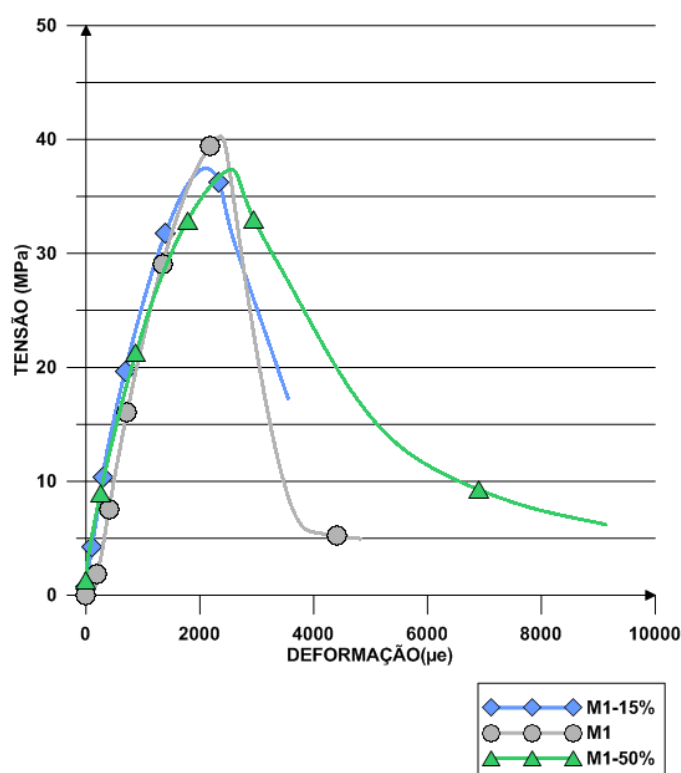


Figura 22 - Curvas tensão x deformação de um dos corpos de prova das diferentes misturas de argamassa rica

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

As tensões máximas obtidas no ensaio para os diferentes teores de substituição estão apresentadas na tabela 11 e na figura 23.

Tabela 11 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa rica

| Misturas | Resistência à compressão (MPa) | |
|----------|--------------------------------|------|
| | Média | DP |
| M1 | 40,83 | 1,09 |
| M1-15% | 38,17 | 1,52 |
| M1-50% | 36,79 | 1,61 |

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

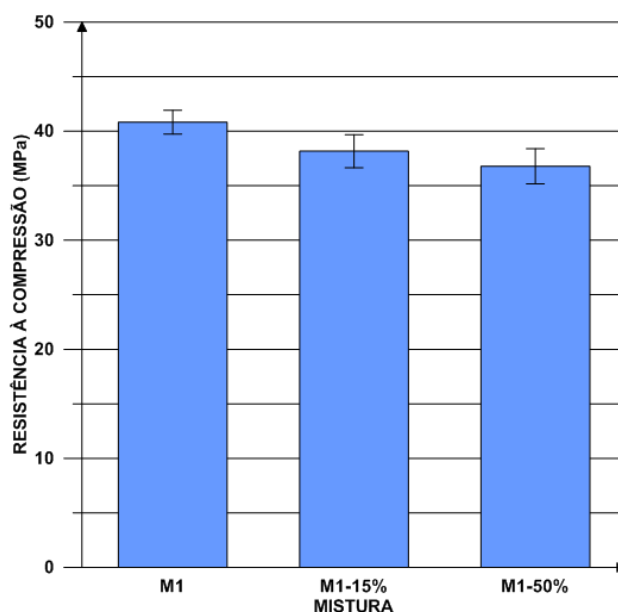


Figura 23 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa rica

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

De acordo com os resultados apresentados, percebe-se que ocorreu uma redução da resistência à compressão com o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo reciclado. As misturas M1-15% e M1-50% sofreram uma redução de resistência à compressão de 6,5% e 9,9%, respectivamente, em relação à mistura M1. De acordo com a análise estatística, foi observada uma redução significativa da resistência à

compressão de todas as misturas com agregado reciclado em relação à mistura com agregado natural.

Os valores do módulo de elasticidade obtidos para a argamassa rica estão apresentados na tabela 12 e na figura 24.

Tabela 12 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa rica

| Misturas | Módulo de Elasticidade (GPa) | |
|----------|------------------------------|------|
| | Média | DP |
| M1 | 24,82 | 1,80 |
| M1-15% | 26,59 | 2,02 |
| M1-50% | 24,38 | 0,65 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

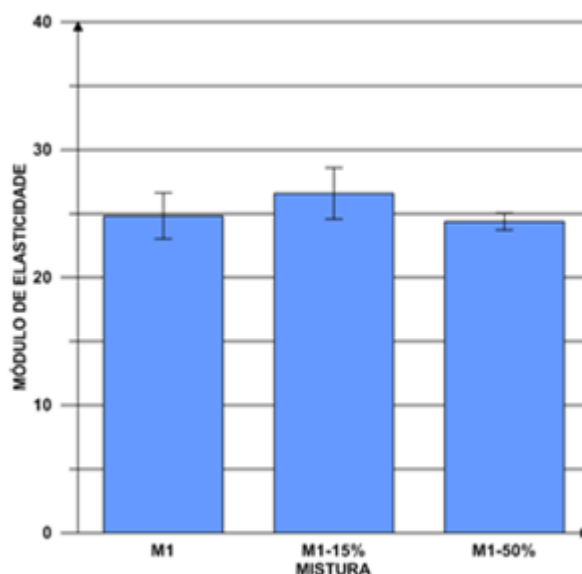


Figura 24 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa rica

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Foi observado que o módulo de elasticidade da mistura M1-15% sofreu um aumento de 7,1%, enquanto a M1-50% sofreu uma redução de 1,8% em relação à referência M1. De acordo com a análise estatística, notou-se que não houve diferença significativa entre as misturas com agregado reciclado e a com agregado natural.

Desta forma, pode-se afirmar que para a argamassa rica o módulo de elasticidade não sofreu alteração significativa e, portanto, a argamassa produzida com agregado reciclado é tão rígida quanto a produzida com agregado natural.

4.4.1.3. Misturas de argamassa mediana

As curvas tensão x deformação características dos corpos de prova das diferentes misturas de argamassa mediana foram traçadas. A figura 25 apresenta a curva correspondente a um dos corpos de prova que melhor representa cada mistura.

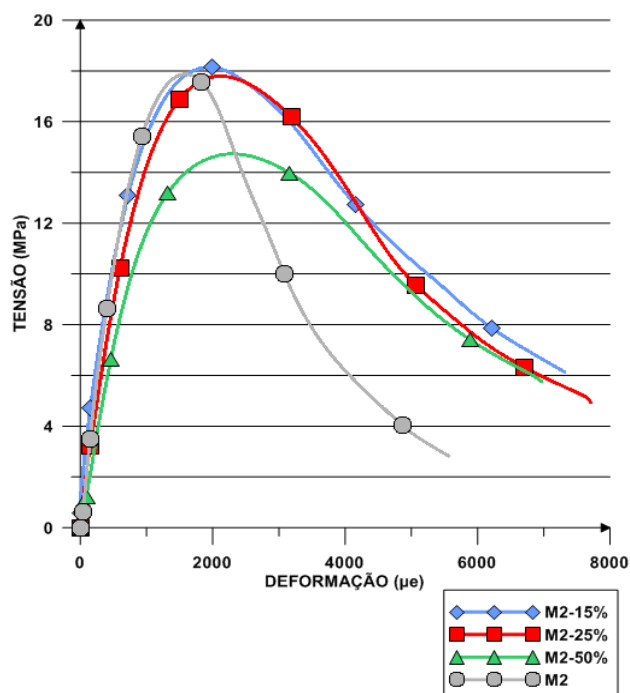


Figura 25 - Curvas tensão x deformação de um dos corpos de prova das diferentes misturas de argamassa mediana

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Os valores de resistência à compressão obtidos no ensaio para as misturas de argamassa mediana estão apresentados na tabela 13 e na figura 26.

Tabela 13 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa mediana

| Misturas | Resistência à compressão (MPa) | |
|----------|--------------------------------|------|
| | Média | DP |
| M2 | 18,09 | 1,15 |
| M2-15% | 18,81 | 0,78 |
| M2-25% | 17,26 | 1,21 |
| M2-50% | 15,19 | 0,85 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

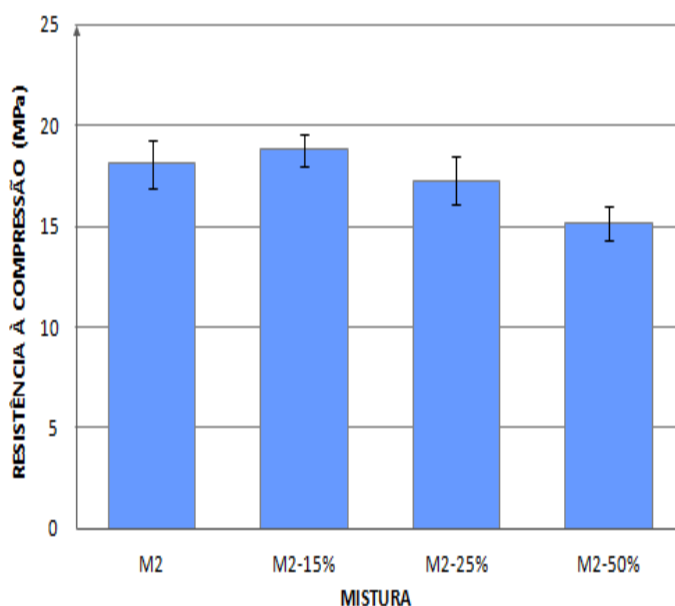


Figura 26 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa mediana

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

De acordo com os resultados apresentados, percebe-se que para as misturas de menores teores de substituição a variação ocorrida na resistência foi pequena. A mistura M2-15% sofreu um acréscimo de 4,0%, enquanto as misturas M2-25% e M2-50% sofreram uma redução na resistência de 4,6% e 16,0% em relação à mistura de referência M2, respectivamente. Utilizando a análise estatística, foi observado que a única mistura que sofreu alteração significativa da resistência comparada à mistura de referência foi a M2-50%.

Conforme o resultado obtido, pode-se afirmar que argamassas medianas produzidas com uma porcentagem de substituição do agregado natural pelo reciclado inferior a 25% se comportam de maneira semelhante à argamassa convencional no que diz respeito a resistência à compressão. Entretanto, para substituições superiores a 25%, ocorre uma diminuição dessa propriedade, podendo a partir de certa porcentagem ser relevante como foi observado na M2-50%.

Os valores do módulo de elasticidade obtidos para a argamassa mediana estão apresentados na tabela 14 e figura 27.

Tabela 14 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa mediana

| Misturas | Módulo de Elasticidade (GPa) | |
|----------|------------------------------|------|
| | Média | DP |
| M2 | 23,54 | 1,19 |
| M2-15% | 21,10 | 0,66 |
| M2-25% | 18,06 | 0,71 |
| M2-50% | 16,22 | 1,91 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

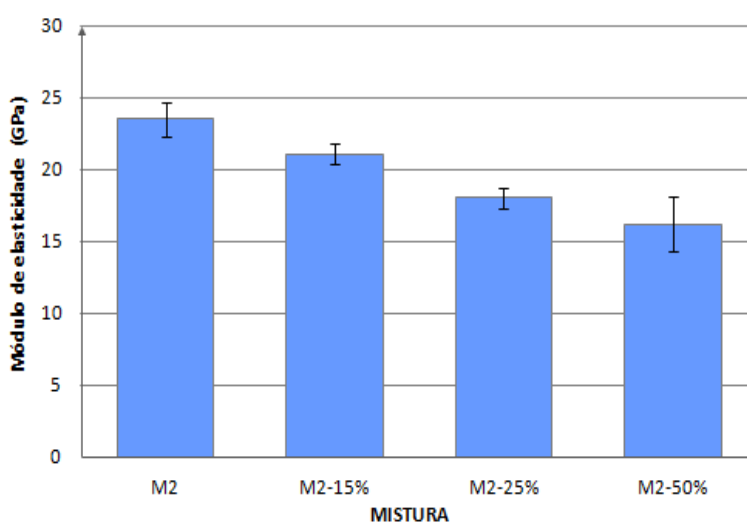


Figura 27 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa mediana

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Foi observado que o módulo de elasticidade das misturas M2-15%, M2-25% e M2-50% sofreu uma redução em relação à mistura de referência M2 de 10,4%, 23,3% e 31,1%, respectivamente. De acordo com a análise estatística, notou-se que houve uma diferença significativa em relação à mistura de referência em todas as misturas com agregado reciclado, o que é compatível com a análise realizada acima.

Desta forma, pode-se afirmar que à medida que aumenta o teor de substituição do agregado natural pelo reciclado nas argamassas medianas, ocorre também uma progressiva redução no valor do módulo de elasticidade das mesmas, fazendo com que fiquem menos rígidas.

4.4.1.4. Misturas de argamassa pobre

As curvas tensão x deformação características dos corpos de prova das diferentes misturas de argamassa pobre foram traçadas. A figura 28 apresenta a curva correspondente a um dos corpos de prova que melhor representa cada mistura.

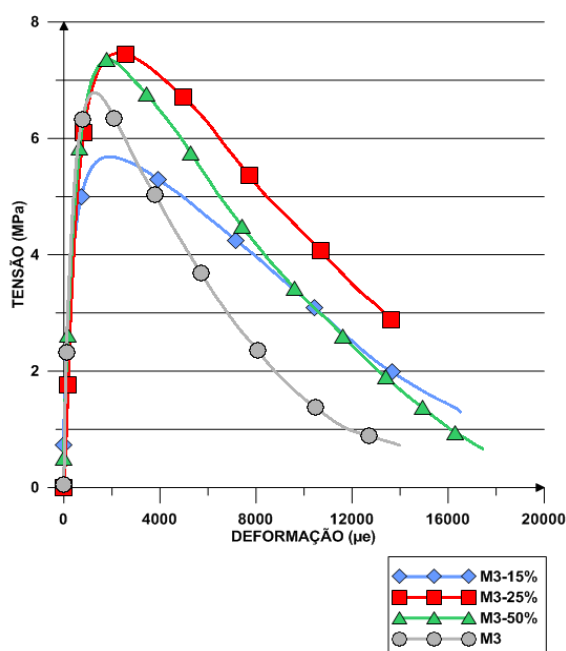


Figura 28 - Curvas tensão x deformação de um dos corpos de prova das diferentes misturas de argamassa pobre

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

As tensões máximas obtidas no ensaio para os diferentes teores de substituição estão apresentadas na tabela 15 e na figura 29.

Tabela 15 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa pobre

| Misturas | Resistência à compressão (MPa) | |
|----------|--------------------------------|------|
| | Média | DP |
| M3 | 6,16 | 1,09 |
| M3-15% | 5,60 | 0,38 |
| M3-25% | 7,87 | 0,94 |
| M3-50% | 7,16 | 0,51 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

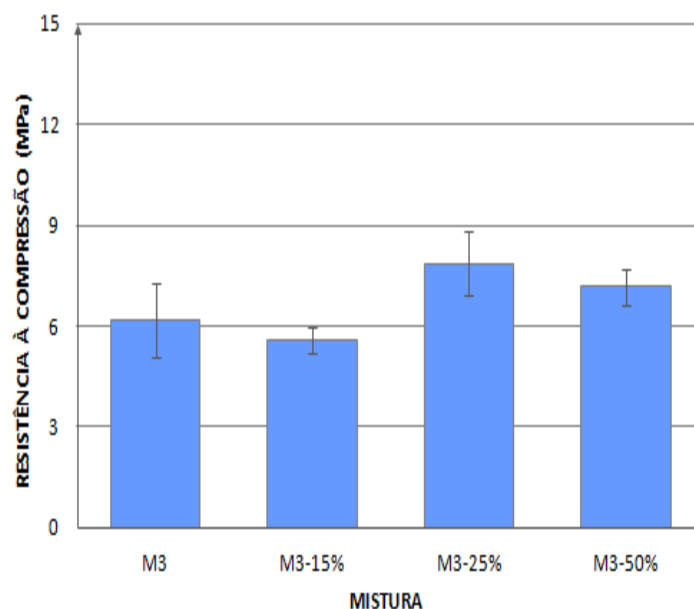


Figura 29 - Resistência à compressão das diferentes misturas de argamassa pobre

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Foi notado que a mistura M3-15% sofreu uma redução de 9,0%, enquanto as misturas M3-25% e M3-50% sofreram um acréscimo na resistência de 27,8% e 16,2% em relação à mistura de referência, respectivamente. De acordo com a análise estatística, a única mistura que sofreu alteração significativa da resistência comparada à mistura de referência foi a M3-25%. Como ocorreu um incremento da resistência na mesma, o resultado obtido pode ser considerado satisfatório.

Os valores do módulo de elasticidade obtidos para a argamassa pobre estão apresentados na tabela 16 e na figura 30.

Tabela 16 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa pobre

| Misturas | Módulo de Elasticidade (GPa) | |
|---------------|------------------------------|------|
| | Média | DP |
| M3 | 14,54 | 2,61 |
| M3-15% | 12,88 | 1,11 |
| M3-25% | 11,17 | 4,37 |
| M3-50% | 10,98 | 1,03 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

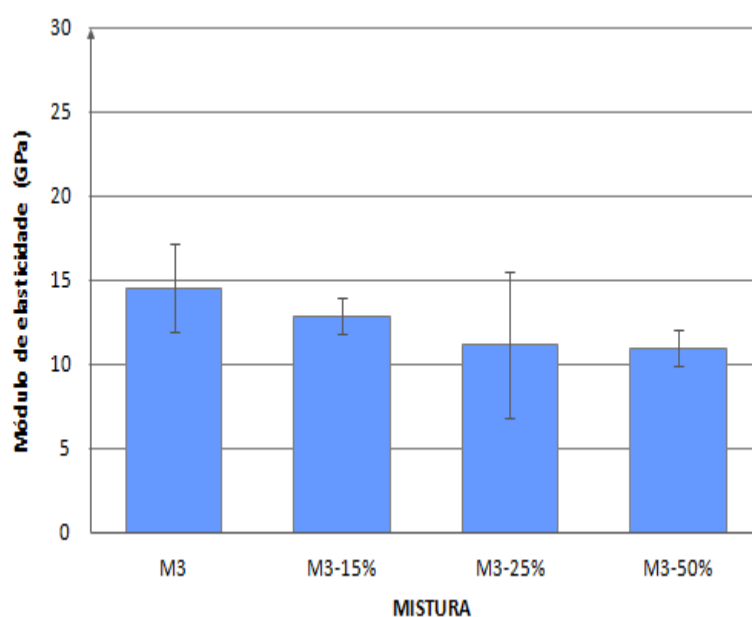


Figura 30 - Módulo de elasticidade das diferentes misturas de argamassa pobre

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Foi observado que o módulo de elasticidade das misturas M3-15%, M3-25% e M3-50% sofreu uma redução em relação à mistura de referência M3 de 11,4%, 23,2% e 24,5%, respectivamente. De acordo com a análise estatística, observou-se que em nenhuma mistura com agregado reciclado houve uma diferença significativa do módulo de elasticidade e, desta forma, pode-se concluir que o resultado obtido foi positivo.

4.4.2. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

4.4.2.1. Misturas de argamassa rica

Para a análise dos dados obtidos, foram calculados a resistência à tração média e o desvio padrão das misturas de argamassa rica. O resultado encontra-se na tabela 17 e na figura 31.

Tabela 17 - Resistência à tração das misturas de argamassa rica

| Misturas | Tensão (MPa) | DP |
|----------|--------------|------|
| M1 | 3,88 | 0,38 |
| M1-15% | 3,75 | 0,45 |
| M1-25% | 3,80 | 0,21 |
| M1-50% | 3,75 | 0,22 |

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

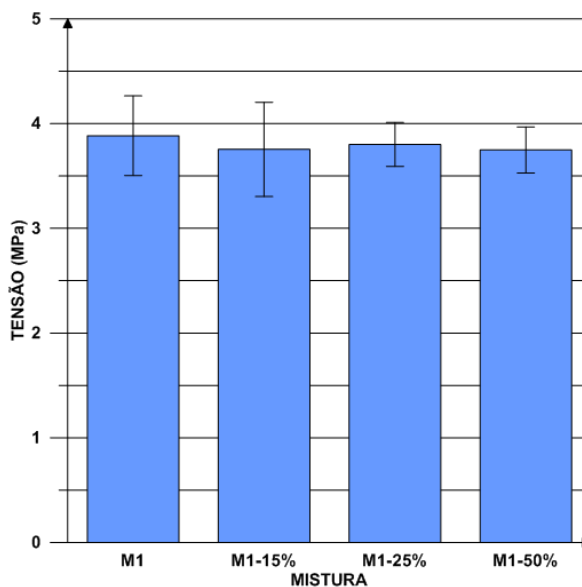


Figura 31- Resistência à tração das misturas de argamassa rica

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

Nota-se que as misturas M1-15%, M1-25% e M1-50% sofreram uma pequena redução de resistência à tração de 3,4%, 2,1% e 3,4% em relação à mistura M1, respectivamente. De acordo com a análise estatística, foi observado que nenhuma mistura com agregado reciclado apresentou redução significativa da resistência à tração.

4.4.2.2. Misturas de argamassa mediana

O resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as diferentes misturas de argamassa mediana encontra-se na tabela 18 e na figura 32.

Tabela 18- Resistência à tração das misturas de argamassa mediana

| Misturas | Tensão (MPa) | DP |
|----------|--------------|------|
| M2 | 2,17 | 0,27 |
| M2-15% | 2,42 | 0,29 |
| M2-25% | 2,43 | 0,36 |
| M2-50% | 2,14 | 0,24 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

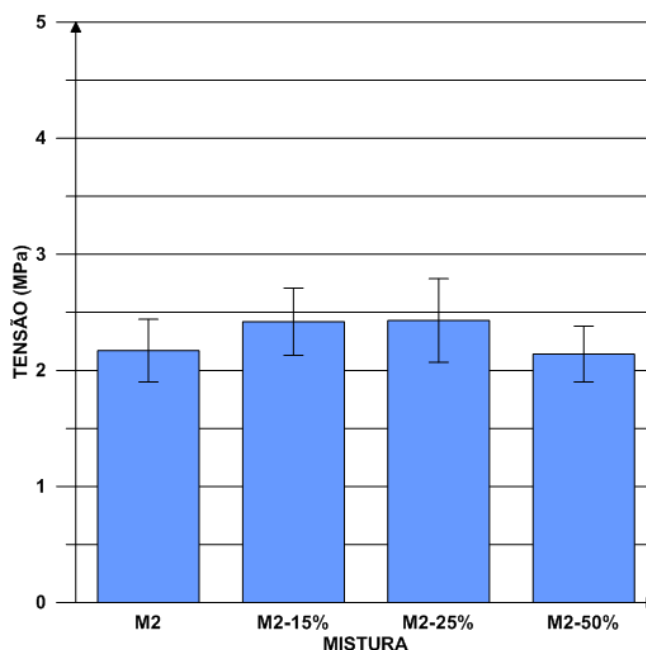


Figura 32- Resistência à tração das misturas de argamassa mediana

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Nota-se que nas misturas M2-15% e M2-25% ocorreu um acréscimo da resistência à tração em relação à mistura de referência M2 de 11,6% e 12,0%, respectivamente. Já a mistura M2-50% apresentou uma redução de 1,4% em relação a M2. Através da análise

estatística, observou-se que nenhuma das misturas com agregado reciclado apresentou uma variação significativa da resistência à tração, podendo concluir que o resultado obtido foi satisfatório.

4.4.2.3. Misturas de argamassa pobre

O resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as diferentes misturas de argamassa pobre encontra-se na tabela 19 e na figura 33.

Tabela 19- Resistência à tração das misturas de argamassa pobre

| Misturas | Tensão (MPa) | DP |
|----------|--------------|------|
| M3 | 1,01 | 0,12 |
| M3-15% | 0,83 | 0,16 |
| M3-25% | 1,15 | 0,15 |
| M3-50% | 1,00 | 0,11 |

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

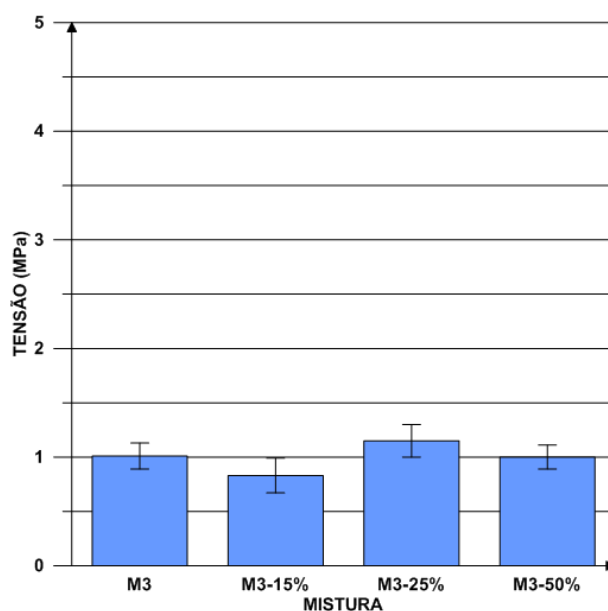


Figura 33- Resistência à tração das misturas de argamassa pobre

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

Foi observado que a resistência à tração das misturas M3-15% e M3-50% sofreu uma redução em relação à mistura de referência M3 de 17,8% e 1,0%, respectivamente. Já a mistura M3-25% sofreu um acréscimo de 13,9% da mesma propriedade. Através da análise estatística, observou-se que apenas na mistura M3-50% não ocorreu uma diferença significativa na resistência à tração em relação à mistura de referência,

Desta forma, não se pode concluir se a argamassa pobre com agregado reciclado apresentará bom desempenho comparado ao da argamassa com agregado natural. Apesar do resultado obtido para as misturas M3-25% e M3-50% ser positivo, visto que ocorreu acréscimo da resistência à tração ou se manteve constante, a mistura M3-15% apresentou redução desta propriedade, o que dificulta obter uma clara conclusão para o ensaio realizado.

4.5. PROPRIEDADES FÍSICAS

4.5.1. Absorção de Água por Capilaridade

Conforme citado no capítulo 3, a absorção de água por capilaridade é dividida em dois estágios: o primeiro possui comportamento linear e ocorre nos poros capilares médios e o segundo, cujo comportamento é não linear, ocorre nos poros capilares pequenos.

Pode-se supor que a redução na absorvidade represente um refinamento da microestrutura das misturas provocado por uma possível formação de novos hidratos ou pelo preenchimento dos poros existentes.

4.5.1.1. Misturas de argamassa rica

A tabela 20 apresenta as absorvidades e o ponto de saturação das misturas de argamassa rica.

Tabela 20- Absortividade e ponto de saturação das misturas de argamassa rica

| Misturas | Absortividade (g/cm².t^{1/2}) | | Ponto de saturação |
|-----------------|---|-------------------------------|---------------------------|
| | Coefficiente Estágio 1 | Coefficiente Estágio 2 | |
| M1 | 0,0464 | 0,0111 | 0,49 |
| M1-15% | 0,0774 | 0,0059 | 0,86 |
| M1-25% | 0,0563 | 0,0166 | 0,69 |
| M1-50% | 0,0693 | 0,0182 | 0,92 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

De acordo com a tabela 20, percebe-se que para a mistura M1-15% ocorreu acréscimo da absortividade nos poros médios, redução da absortividade nos poros pequenos e acréscimo no ponto de saturação quando comparada à mistura de referência. Já as misturas M1-25% e M1-50% apresentaram um acréscimo da absortividade nos poros médios e pequenos e um acréscimo no ponto de saturação.

Na figura 34 podem ser observadas as curvas de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo para as misturas deste traço.

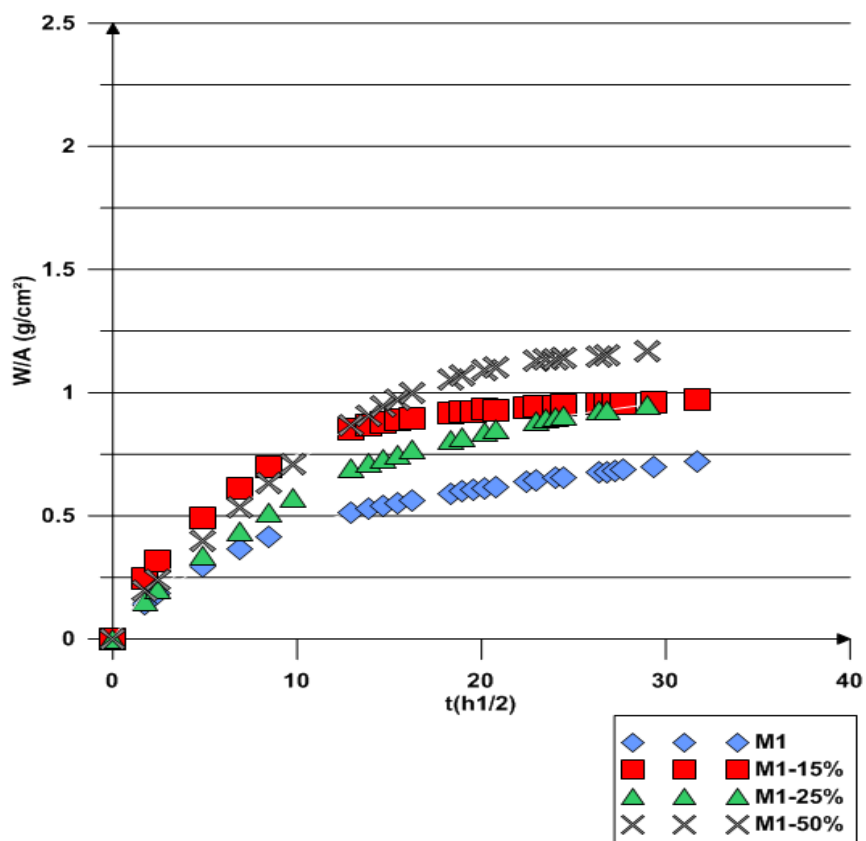


Figura 34 - Ganho acumulativo de água em função da raiz quadrada do tempo para as misturas de argamassa rica

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

De acordo com o gráfico apresentado na figura 34, percebe-se que a mistura M1-15% possui a maior absorvidade no primeiro estágio, seguida das misturas M1-50% e M1-25% e por último, da mistura de referência M1. Já no segundo estágio a mistura M1-50% apresenta a maior absorção de água, seguida das misturas M1-15%, M1-25% e novamente por último, a mistura M1.

4.5.1.2 Misturas de argamassa mediana

A tabela 21 apresenta as absorvidades e o ponto de saturação das diferentes misturas de argamassa mediana.

Tabela 21- Absortividade e ponto de saturação das misturas de argamassa mediana

| Misturas | Absortividade (g/cm ² .t ^{1/2}) | | Ponto de saturação |
|----------|--|------------------------|--------------------|
| | Coefficiente Estágio 1 | Coefficiente Estágio 2 | |
| M2 | 0,0845 | 0,0149 | 0,95 |
| M2-15% | 0,1049 | 0,0139 | 1,15 |
| M2-25% | 0,0738 | 0,0113 | 1,33 |
| M2-50% | 0,1652 | 0,0043 | 1,74 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

De acordo com a tabela 21, percebe-se que na mistura M2-15% a absortividade sofreu aumento nos poros médios, redução nos poros pequenos e o ponto de saturação apresentou um acréscimo. Já na mistura M2-25% a absortividade sofreu redução tanto nos poros médios quanto nos pequenos e acréscimo no ponto de saturação. Na mistura M2-50% pode-se observar que ocorreu acréscimo da absortividade nos poros médios e redução nos pequenos e novamente observou-se acréscimo no ponto de saturação.

Na figura 35 podem ser observadas as curvas de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo para as misturas de argamassa mediana.

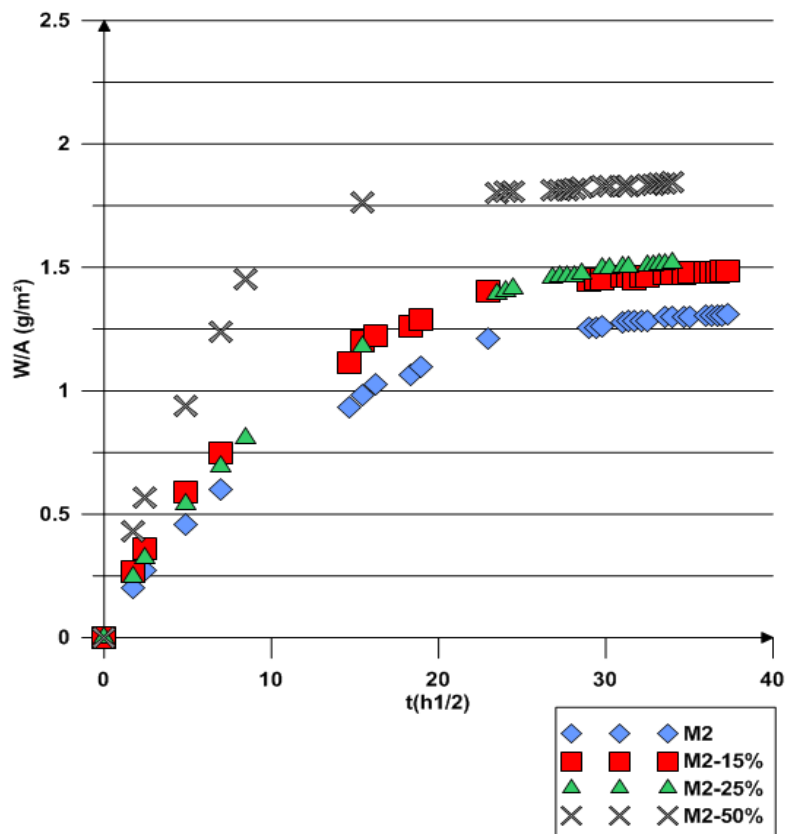


Figura 35 - Ganho acumulativo de água em função da raiz quadrada do tempo para as misturas de argamassa mediana

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

De acordo com o gráfico, percebe-se que a mistura M2-50% possui a maior absorvidade no primeiro estágio, seguida das misturas M2-15% e M2-25% e por último, da mistura de referência M2. Observa-se que há uma incompatibilidade nesses resultados, já que a mistura M2-15% absorveu mais água que a M2-25% no primeiro estágio, diferente do que era esperado. Já no segundo estágio, a mistura M2-50% também apresenta a maior absorção de água, seguida das misturas M2-25%, M2-15% e por último, da mistura M2, o que está de acordo com o previsto.

4.5.1.3. Misturas de argamassa pobre

A tabela 22 apresenta as absorvidades e o ponto de saturação das misturas de argamassa pobre.

Tabela 22- Absortividade e ponto de saturação das misturas de argamassa pobre

| Misturas | Absortividade (g/cm ² .t ^{1/2}) | | Ponto de saturação |
|----------|--|------------------------|--------------------|
| | Coefficiente Estágio 1 | Coefficiente Estágio 2 | |
| M3 | 0,1667 | 0,0051 | 1,81 |
| M3-15% | 0,2087 | 0,0040 | 1,91 |
| M3--25% | 0,2164 | 0,0045 | 2,00 |
| M3-50% | 0,2347 | 0,0040 | 2,16 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

De acordo com a tabela 22, pode-se observar que em todas as misturas com substituição ocorreu acréscimo na absortividade dos poros médios e redução nos poros pequenos. Nota-se também que todas apresentaram acréscimo no ponto de saturação.

Na figura 36 podem ser observadas as curvas de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo para as misturas deste traço.

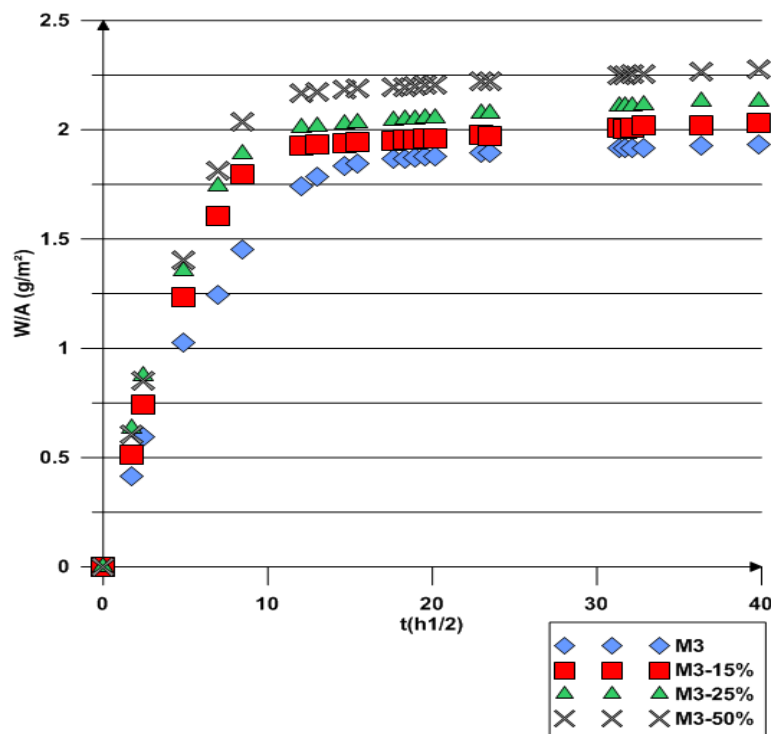


Figura 36 - Ganho acumulado de água em função da raiz quadrada do tempo para as misturas de argamassa pobre

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Pelo gráfico da figura 36, percebe-se que em ambos os estágios a mistura M3-50% possui a maior absorvidade, seguida das misturas M3-25% e M3-15% e por último, da mistura de referência M3.

4.5.2. Absorção por Imersão

São apresentados os resultados para a massa específica, absorção e índice de vazios das misturas obtidos no ensaio absorção por imersão de acordo com os procedimentos descritos no 3.2.5.2.

A comparação entre os resultados das diferentes misturas foi realizada pela análise de variância (ANOVA) com nível de confiança de 95% através do programa Oringin Pro 8. Novamente foi utilizado o teste de Tukey para comparar as médias das misturas com substituição e da mistura de referência e, deste modo, verificar se ocorreu alteração significativa na propriedade.

4.5.2.1 Misturas de argamassa rica

Os valores obtidos para massa específica, absorção e índice de vazios das misturas de argamassa rica encontram-se na tabela 23, tabela 24 e tabela 25 e figura 37, figura 38 e figura 39, respectivamente.

Tabela 23 - Massa específica das misturas de argamassa rica

| Misturas | Massa Específica Real (g/cm ³) | DP |
|----------|--|------|
| M1 | 2,30 | 0,02 |
| M1-15% | 2,27 | 0,02 |
| M1-25% | 2,29 | 0,02 |
| M1-50% | 2,26 | 0,02 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

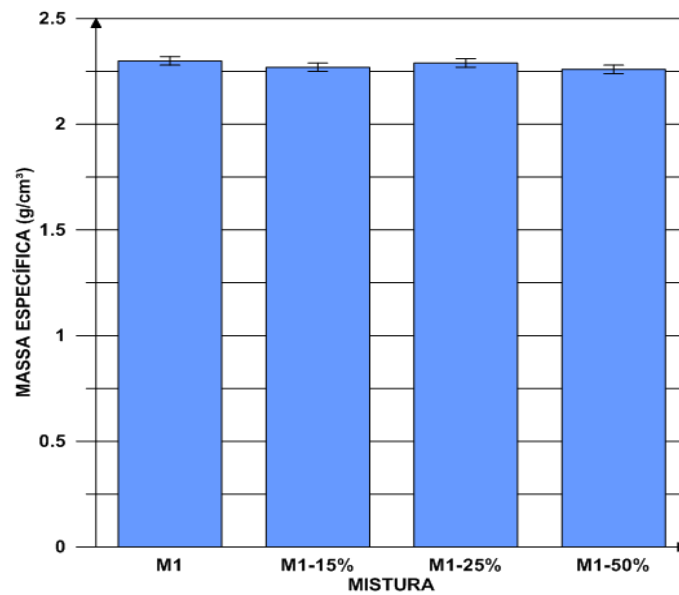


Figura 37- Massa específica das misturas de argamassa rica

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Pode-se notar que a diferença entre a massa específica das misturas de argamassa rica ocorreu em centésimos e houve uma redução na massa específica de 1,3%, 0,4% e 1,7% para as misturas M1-15%, M1-25% e M1-50%, respectivamente. A análise estatística ANOVA foi inconclusiva, o que pode ter sido ocasionado pelo desvio padrão.

Tabela 24 - Absorção das misturas de argamassa rica

| Misturas | Absorção - A % | DP |
|---------------|----------------|------|
| M1 | 4,30 | 0,24 |
| M1-15% | 4,57 | 0,27 |
| M1-25% | 5,82 | 0,38 |
| M1-50% | 6,46 | 0,59 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

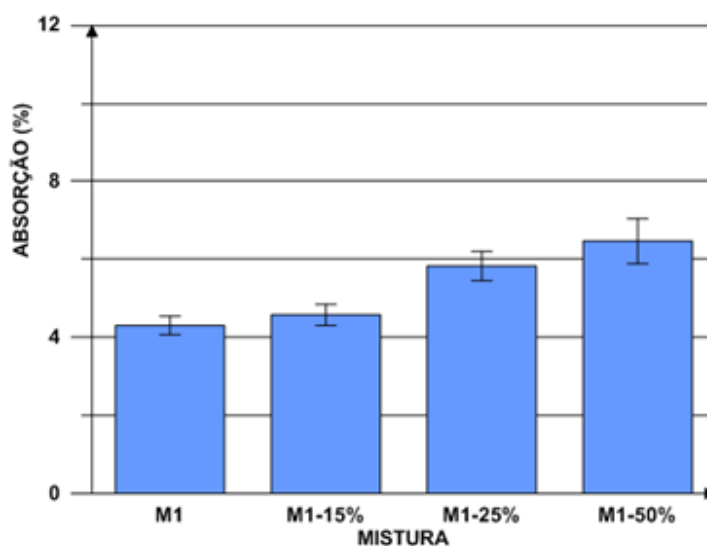


Figura 38-Absorção das misturas de argamassa rica

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

De acordo com a tabela 24, pode-se observar um crescimento na absorção das misturas M1-15%, M1-25% e M1-50% de 6,3%, 35,4% e 50,2%, respectivamente. De acordo com a análise estatística, pode-se afirmar que apenas a mistura M1-15% não apresentou alteração significativa na absorção em relação à mistura de referência. Além disso, nota-se também que a absorção sofre um acréscimo significativo com o aumento do teor de substituição e, desta forma, pode-se concluir que o teor de substituição empregado influencia a absorção das argamassas.

A tabela 25 e a figura 39 facilitam a visualização desta questão ao apresentarem o índice de vazios presentes nas misturas.

Tabela 25 - Índice de vazios das misturas de argamassa rica

| Misturas | Índice de vazios - Iv % | DP |
|----------|-------------------------|------|
| M1 | 8,98 | 0,48 |
| M1-15% | 9,40 | 0,54 |
| M1-25% | 11,75 | 0,71 |
| M1-50% | 12,73 | 1,05 |

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

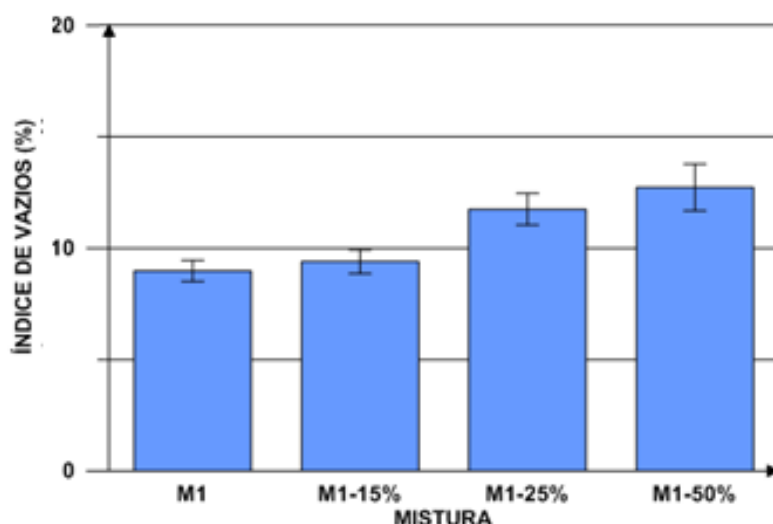


Figura 39 - Índices de vazios nas misturas de argamassa rica

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Nota-se que as misturas M1-15%, M1-25% e M1-50% apresentaram um aumento do índice de vazios de 4,7%, 30,9% e 41,8%, respectivamente. Através da análise estatística, observou-se que apenas a mistura com 15% de substituição não apresentou alteração significativa no índice de vazios. Notou-se também que ocorreu um acréscimo significativo desta propriedade com o aumento do teor de substituição.

4.5.2.2 Misturas de argamassa mediana

Os valores obtidos para massa específica das misturas de argamassa mediana encontram-se na tabela 26 e na figura 40.

Tabela 26- Massa específica das misturas de argamassa mediana

| Misturas | Massa Específica Real (g/cm ³) | DP |
|----------|--|------|
| M2 | 2,27 | 0,02 |
| M2-15% | 2,27 | 0,02 |
| M2-25% | 2,32 | 0,02 |
| M2-50% | 2,30 | 0,03 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

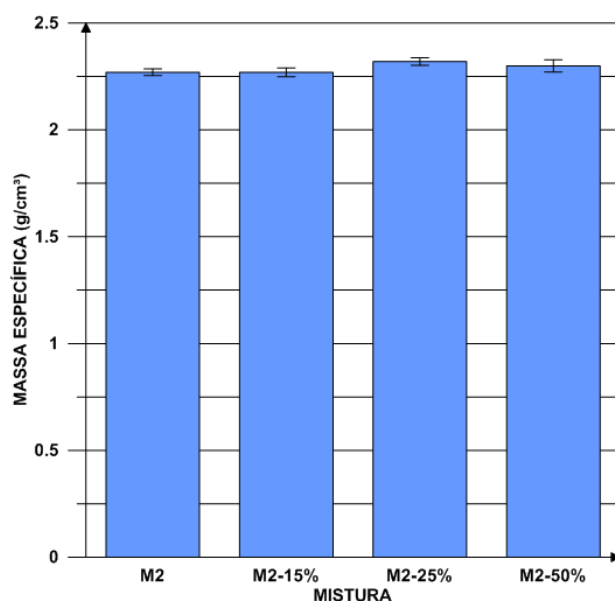


Figura 40 - Massa específica para as misturas de argamassa mediana

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

De acordo com a tabela 26, pode-se notar que a mistura M2-15% não apresentou variação de massa específica em relação à mistura de referência M2. Na mistura M2-25% observou-se um acréscimo de 2,2%, enquanto na M2-50% ocorreu uma redução de 1,3%. Através da análise estatística, notou-se que apenas a mistura 15% não apresentou alteração significativa nesta propriedade.

A absorção das misturas de argamassa mediana está apresentada na tabela 27 e na figura 41.

Tabela 27- Absorção das misturas de argamassa mediana

| Misturas | Absorção - A % | DP |
|----------|----------------|------|
| M2 | 7,10 | 0,32 |
| M2-15% | 7,75 | 0,42 |
| M2-25% | 8,91 | 0,87 |
| M2-50% | 9,82 | 0,68 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

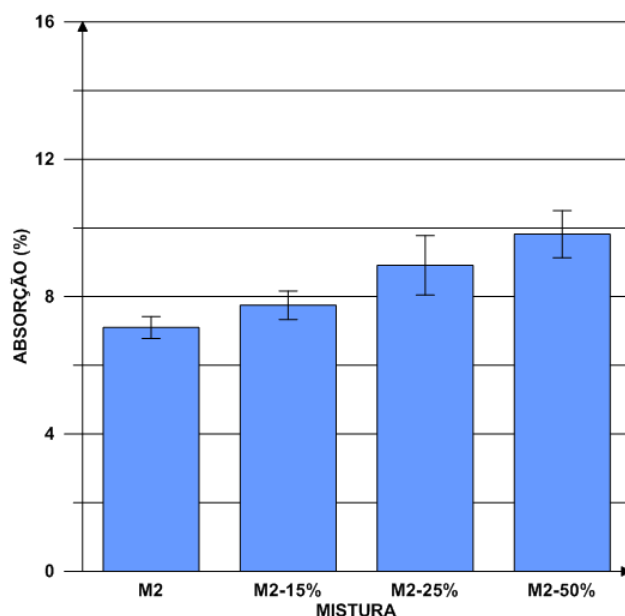


Figura 41- Absorção das misturas de argamassa mediana

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Percebe-se que houve um crescimento na absorção das misturas M2-15%, M2-25% e M2-50% de 9,2%, 25,5% e 38,3%, respectivamente. De acordo com a análise estatística, pode-se afirmar que todas as misturas apresentaram alteração significativa da absorção em relação à mistura de referência. Além disso, nota-se que a absorção sofreu um acréscimo significativo com o aumento do teor de substituição e, desta forma, pode-se concluir que o teor de substituição empregado influencia a absorção das argamassas.

A tabela 28 e a figura 42 apresentam o índice de vazios presentes nas misturas de argamassa mediana.

Tabela 28- Índice de vazios das misturas de argamassa mediana

| Misturas | Índice de vazios - Iv % | DP |
|----------|-------------------------|------|
| M2 | 13,85 | 0,54 |
| M2-15% | 14,94 | 0,74 |
| M2-25% | 17,14 | 1,38 |
| M2-50% | 18,44 | 1,02 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

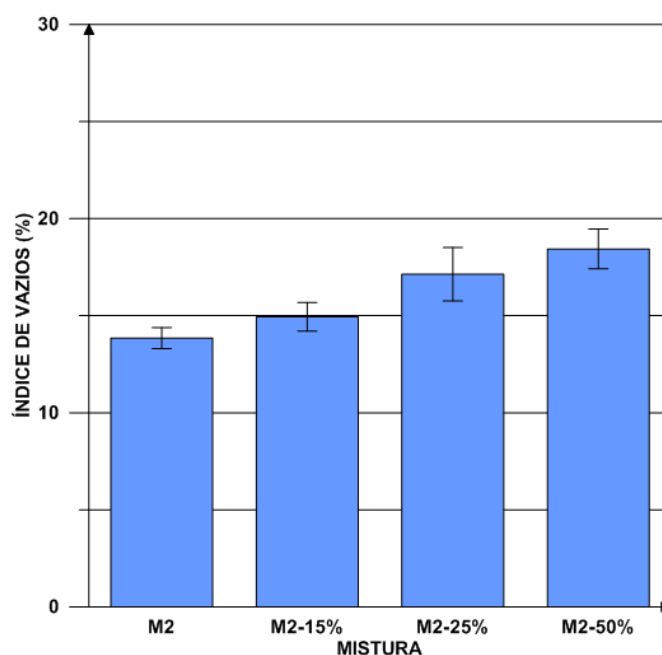


Figura 42- Índice de vazios das misturas de argamassa mediana

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

Nota-se que as misturas M2-15%, M2-25% e M2-50% apresentaram um aumento do índice de vazios de 4,7%, 30,9% e 41,8%, respectivamente. Através da análise estatística, observou-se que todas as misturas apresentaram alteração no índice de vazios quando comparadas às misturas de referência e que ocorreu um acréscimo significativo nesta propriedade com o aumento no teor de substituição.

4.5.2.3 Misturas de argamassa pobre

Os valores obtidos para massa específica das misturas de argamassa pobre encontram-se na tabela 29 e na figura 43.

Tabela 29- Massa específica das misturas de argamassa pobre

| Misturas | Massa Específica Real (g/cm ³) | DP |
|----------|--|------|
| M3 | 2,39 | 0,03 |
| M3-15% | 2,39 | 0,04 |
| M3-25% | 2,43 | 0,02 |
| M3-50% | 2,44 | 0,02 |

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

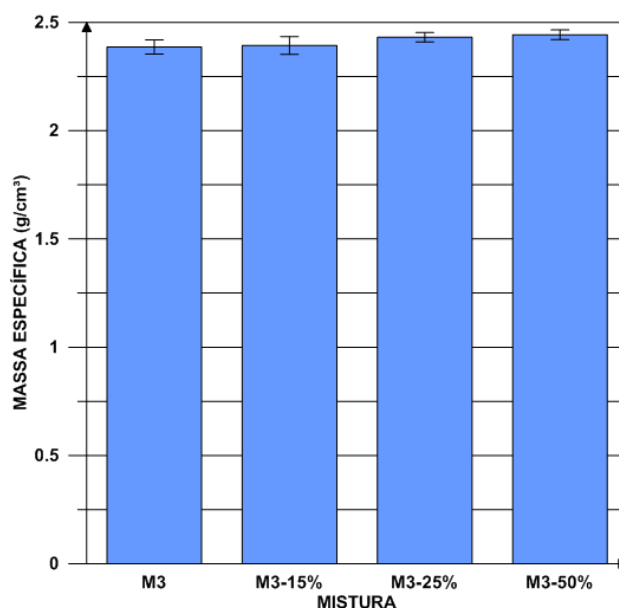


Figura 43 - Massa específica das misturas de argamassa pobre

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

De acordo a tabela 29, percebe-se que a mistura M3-15% não apresentou variação de massa específica em relação à mistura de referência M3. Já nas misturas M3-25% e M3-50% foi observado um acréscimo de 1,7% e 2,1%, respectivamente. Através da análise estatística, notou-se que apenas a mistura com 15% de substituição não apresentou diferença significativa em relação à mistura de referência. Observou-se também que não houve alteração entre a massa específica das misturas com 25% e 50%.

A absorção das misturas de argamassa pobre está apresentada na tabela 30 e na figura 44.

Tabela 30- Absorção das misturas de argamassa pobre

| Misturas | Absorção - A % | DP |
|----------|----------------|------|
| M3 | 11,37 | 0,69 |
| M3-15% | 13,22 | 0,58 |
| M3-25% | 13,11 | 0,88 |
| M3-50% | 14,93 | 0,88 |

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

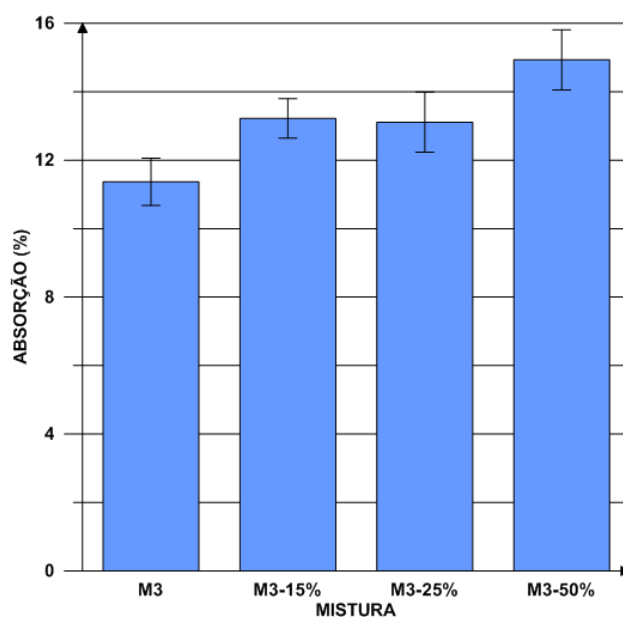


Figura 44 - Absorção das misturas de argamassa pobre

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

Através da tabela 30, percebe-se que as misturas com agregados reciclados apresentaram acréscimo na absorção das misturas M3-15%, M3-25% e M3-50% de 16,3%, 15,3% e 31,3%, respectivamente. De acordo com a análise estatística, pode-se afirmar que todas as misturas apresentaram alteração significativa em relação à mistura de referência. Além disso, nota-se que entre as misturas com 15% e 25% não houve diferença nesta propriedade e que a mistura com 50% de substituição foi onde ocorreu a maior absorção.

A tabela 31 e a figura 45 apresentam o índice de vazios presentes nas misturas de argamassa pobre.

Tabela 31- Índice de vazios das misturas de argamassa pobre

| Misturas | Índice de vazios - Iv % | DP |
|----------|-------------------------|------|
| M3 | 21,34 | 1,20 |
| M3-15% | 24,03 | 0,85 |
| M3-25% | 24,16 | 1,27 |
| M3-50% | 26,72 | 1,24 |

Fonte: Calcado e Ferreira, 2013.

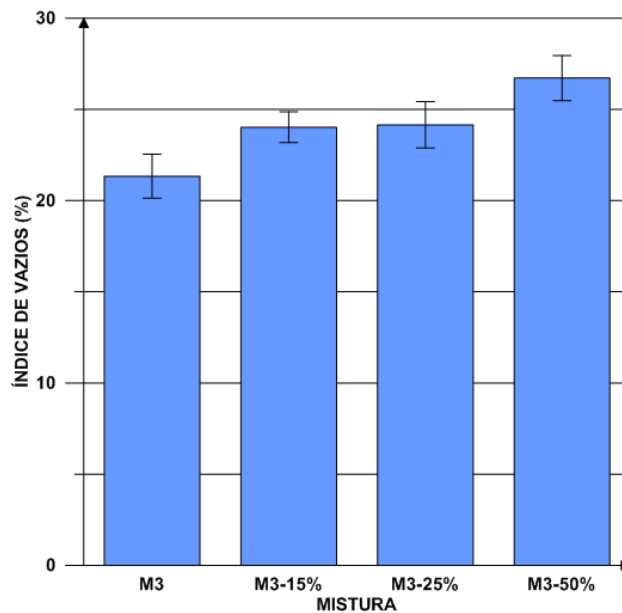


Figura 45 - Índice de vazios das misturas de argamassa pobre

Fonte: Calçado e Ferreira, 2013.

Nota-se que as misturas M3-15%, M3-25% e M3-50% apresentaram um aumento do índice de vazios de 12,6%, 13,2% e 25,2%, respectivamente. De acordo com a análise estatística, observou-se que todas as misturas apresentaram acréscimo significativo desta propriedade e que a mistura com 50% de substituição apresentou o maior aumento.

4.6 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DAS MISTURAS DE ARGAMASSA

A tabela 32 e a figura 46 apresentam a relação entre as propriedades físicas e mecânicas das misturas de referência da argamassa rica, mediana e pobre.

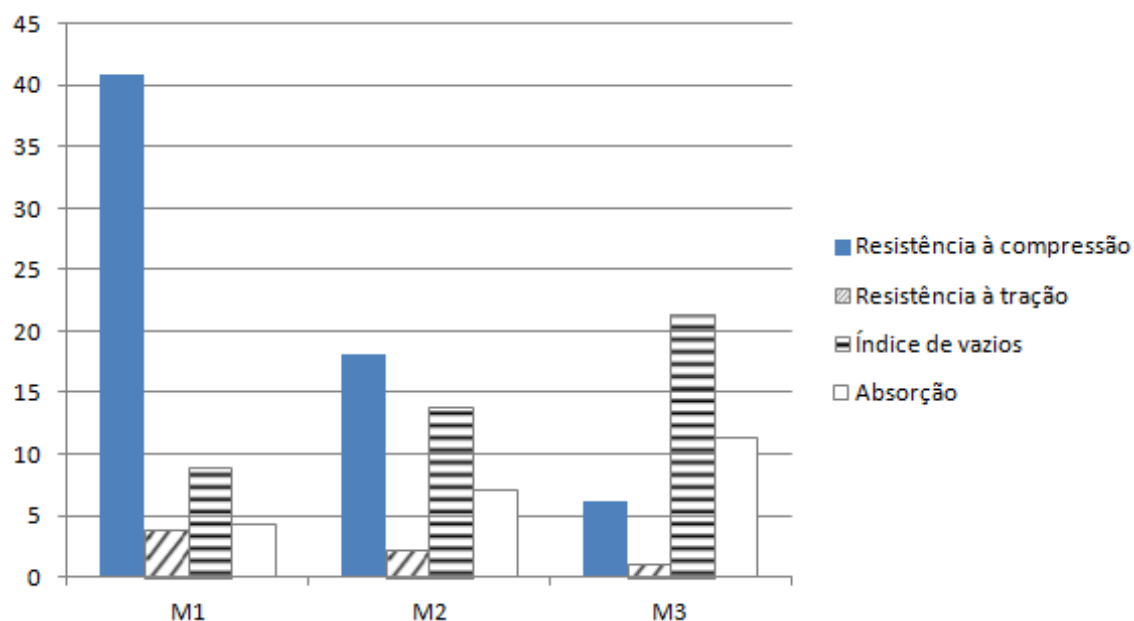


Figura 46 - Relação entre propriedades mecânicas e físicas para as misturas de referência

Tabela 32- Relação entre as propriedades mecânicas e físicas das misturas de referências

| Mistura | Resistência à compressão (MPa) | Resistência à tração (MPa) | Índice de vazios -% | Absorção - % |
|---------|--------------------------------|----------------------------|---------------------|--------------|
| M1 | 40,83 | 3,88 | 8,98 | 4,30 |
| M2 | 18,09 | 2,17 | 13,85 | 7,10 |
| M3 | 6,16 | 1,01 | 21,34 | 11,37 |

De acordo com a tabela 32 e a figura 46, nota-se uma clara relação entre as propriedades apresentadas. Pode-se observar que ao aumentar o teor de agregados e água presentes na mistura, ou seja, ao empobrecer o traço, ocorreu uma redução na resistência à compressão e à tração das misturas. Percebe-se também que houve um aumento gradual no índice de vazios nas misturas de argamassa mediana e pobre, o que ocasiona um

acréscimo da absorção e pode explicar a diminuição das propriedades físicas citadas anteriormente.

Desta forma, é confirmada a relação existente entre as propriedades físicas e mecânicas das argamassas em estudo. À medida que a mistura se torna mais pobre, ela se torna também mais porosa, ocorrendo um aumento no volume de vazios no interior da mesma e da sua capacidade de absorção e, conseqüentemente, menor a resistência à tração e à compressão das misturas.

4.7 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO

A relação existente entre a resistência à tração e à compressão é uma análise interessante de ser realizada. A tabela 33 apresenta essa relação para as misturas de argamassa rica.

Tabela 33- Relação entre a resistência à tração e à compressão para as misturas de argamassa rica

| Misturas | Resistência à tração/ Resistência à compressão (ft/fc) | Variação percentual (%) |
|-----------------|---|--------------------------------|
| M1 | 0,095 | - |
| M1-15% | 0,098 | 3,38 |
| M1-50% | 0,102 | 7,26 |

De acordo com a tabela 33, a razão entre a resistência à tração e à compressão está muito próxima a um décimo, como é estimado na literatura. Observa-se que à medida que ocorre um aumento no teor de agregado reciclado na mistura, essa razão aumenta. Como a variação é inferior a 10% para as misturas M1-15% e M1-50%, pode-se dizer que não houve alteração significativa nessa relação.

A relação entre a resistência à tração e à compressão para as misturas de argamassa mediana encontra-se na tabela 34.

Tabela 34- Relação entre a resistência à tração e à compressão para as misturas de argamassa mediana

| Misturas | Resistência à tração/ Resistência à compressão (ft/fc) | Variação percentual (%) |
|----------|--|-------------------------|
| M2 | 0,120 | - |
| M2-15% | 0,129 | 7,3 |
| M2-25% | 0,141 | 17,4 |
| M2-50% | 0,141 | 17,5 |

De acordo com a tabela 34, pode-se notar que houve um aumento na razão entre a resistência à tração e à compressão das misturas de argamassa mediana. Somente a mistura M2-15% apresentou variação inferior a 10% e, portanto, foi a única que não sofreu mudança significativa nessa relação. Já as misturas M2-25% e M2-50% sofreram um acréscimo significativo e esse resultado pode ser interessante do ponto de vista da redução da abertura de fissuras e, conseqüentemente, na durabilidade das misturas.

A tabela 35 apresenta a relação entre a resistência à tração e à compressão para as misturas de argamassa pobre.

Tabela 35- Relação entre a resistência à tração e à compressão para as misturas de argamassa pobre

| Misturas | Resistência à tração/ Resistência à compressão (ft/fc) | Variação percentual (%) |
|----------|--|-------------------------|
| M3 | 0,164 | - |
| M3-15% | 0,148 | 9,6 |
| M3-25% | 0,146 | 10,9 |
| M3-50% | 0,140 | 14,8 |

Pode-se observar através da tabela 35 que ocorreu um aumento gradual na razão entre a resistência à tração e à compressão das misturas de argamassa pobre. Como a mistura M3-15% apresentou variação inferior a 10%, pode-se considerar que não houve alteração significativa nessa relação. Já as misturas M3-25% e M3-50% sofreram uma variação superior a 10% e, portanto, pode-se afirmar que para essa mistura ocorreu um acréscimo relevante da razão entre as resistências.

4.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS MECÂNICOS EM ESTUDO E DO PROJETO DE GRADUAÇÃO DE ALVES (2012)

Neste item será realizada uma comparação entre os resultados obtidos nos ensaios mecânicos deste estudo e do projeto de graduação da aluna Lais Amaral Alves apresentado em 2012. A pesquisa desenvolvida pela mesma foi realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ e buscou avaliar a substituição parcial e total dos agregados naturais por agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em argamassas de três diferentes traços – argamassa rica, mediana e pobre.

Foram utilizados os mesmos traços, métodos de ensaio e cimento em ambas as pesquisas, contudo o agregado reciclado de Alves (2012) foi produzido em laboratório. Foram moldados corpos de prova de três diferentes misturas – mistura rica, mediana e pobre – e, em seguida, os mesmos passaram por britagem separadamente. Deste modo, foram formados três agregados reciclados diferentes que foram utilizados na mesma proporção para a produção das argamassas de cimento Portland.

Outra divergência observada foi o teor de substituição adotado nos estudos. No projeto desenvolvido por Alves (2012), foram produzidas argamassas com um teor de substituição do agregado natural pelo reciclado de 50% e 100%, além das argamassas de referência. Entretanto, visando minimizar as alterações na argamassa resultante e tendo em vista a limitação na disponibilidade do agregado reciclado proveniente do RCD, para esta pesquisa foram adotados teores de substituição equivalentes a 15%, 25% e 50%. Desta forma, serão utilizadas na comparação as misturas de referência e as misturas com 50% de substituição de ambos os estudos.

A nomenclatura adotada para as misturas com agregados reciclados gerados em laboratório por Alves (2012) encontra-se no Quadro 4.

Quadro 4 - Nomenclatura das misturas de Alves (2012)

| Nomenclatura | Descrição |
|--------------|--|
| M1-L | Mistura de referência de argamassa rica |
| M1-50%-L | Mistura com 50% de agregado reciclado de argamassa rica |
| M2-L | Mistura de referência de argamassa mediana |
| M2-50%-L | Mistura com 50% de agregado reciclado de argamassa mediana |
| M3-L | Mistura de referência de argamassa pobre |
| M3-50%-L | Mistura com 50% de agregado reciclado de argamassa pobre |

A figura 47 e a tabela 36 apresentam a resistência à compressão das argamassas pobre, mediana e rica de ambas as pesquisas, permitindo assim uma comparação entre seus resultados.

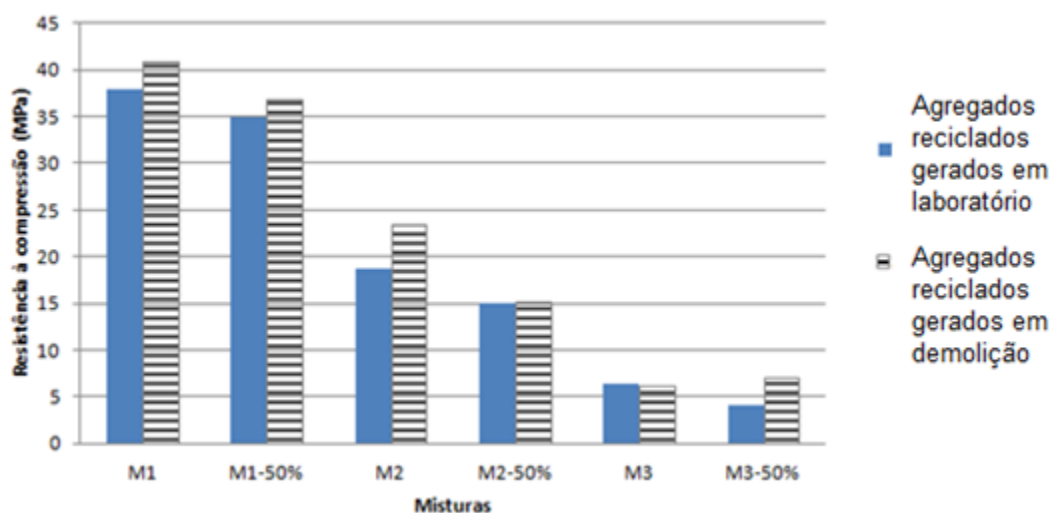


Figura 47- Valores da resistência à compressão das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo

Tabela 36 – Valores da resistência à compressão das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo

| Misturas | Resistência à compressão (MPa) | DP | Variação percentual |
|----------|--------------------------------|------|---------------------|
| M1 – L | 37,99 | 2,06 | - |
| M1 | 40,83 | 1,09 | 7,5% |
| M1-50%-L | 34,91 | 1,3 | - |
| M1-50% | 36,79 | 1,61 | 5,4% |
| M2 – L | 18,75 | 0,23 | - |
| M2 | 23,54 | 1,15 | 25,5% |
| M2-50%-L | 15,06 | 0,85 | - |
| M2-50% | 15,19 | 0,85 | 0,9% |
| M3 – L | 6,33 | 0,06 | - |
| M3 | 6,16 | 1,09 | -2,7% |
| M3-50%-L | 4,03 | 0,26 | - |
| M3-50% | 7,16 | 0,51 | 77,7% |

De acordo com a tabela 36 e a figura 47, pode-se observar que as misturas de argamassa rica com agregados reciclados gerados em demolição M1 e M1-50% apresentaram um aumento na resistência à compressão de 7,5% e 5,4% em relação às misturas com agregados reciclados gerados em laboratório M1-L e M1-50%-L, respectivamente.

Nota-se que as misturas de argamassa mediana com agregados reciclados gerados em demolição M2 e M2-50% houve um aumento na resistência à compressão de 25,6% e 0,9% em relação às misturas M2-L e M2-50%-L, respectivamente. Observa-se também que a mistura M3 sofreu uma redução de 2,7% comparada à mistura M3-L. Já a mistura M3-50% apresentou um acréscimo de 77,7% em relação à mistura M3-50%-L.

A tabela 37 e a figura 48 apresentam os valores do módulo de elasticidade para as misturas de argamassa rica, mediana e pobre de ambos os estudos.

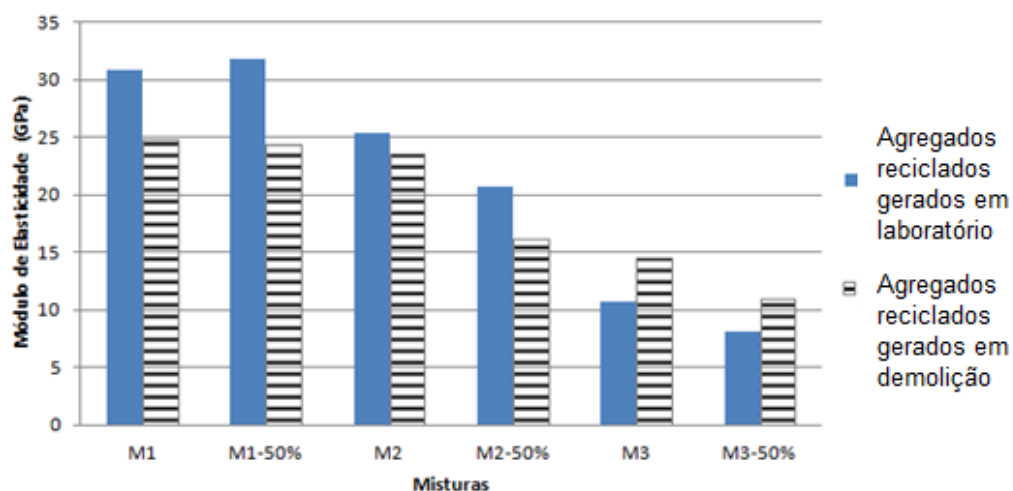


Figura 48 - Valores do módulo de elasticidade das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo

Tabela 37 – Valores do módulo da elasticidade das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo

| Misturas | Módulo de Elasticidade (GPa) | DP | Varição percentual |
|----------|------------------------------|------|--------------------|
| M1 – L | 30,85 | 3,88 | - |
| M1 | 24,82 | 1,8 | -19,5% |
| M1-50%-L | 31,83 | 1,77 | - |
| M1-50% | 24,38 | 0,65 | -23,4% |
| M2 – L | 25,32 | 1,12 | - |
| M2 | 23,54 | 1,19 | -7,0% |
| M2-50%-L | 20,79 | 3,22 | - |
| M2-50% | 16,22 | 1,91 | -22,0% |
| M3 – L | 10,77 | 2,03 | - |
| M3 | 14,54 | 2,61 | 35,0% |
| M3-50%-L | 8,17 | 0,22 | - |
| M3-50% | 10,98 | 1,03 | 34,4% |

Através da tabela 37 e a figura 48, nota-se que nas misturas de argamassa rica M1 e M1-50% ocorreu uma redução significativa de 19,5% e 23,4% em relação às misturas M1-L e M1-50%-L, respectivamente.

Observa-se também que nas misturas de argamassa mediana M2 e M2-50% ocorreu uma redução no módulo de elasticidade de 7% e 22% em relação às misturas M2-L e M2-50%-L, respectivamente. Já as misturas de argamassa pobre M3 e M3-50% apresentaram um aumento no módulo de elasticidade de 35% e 34,4% em relação às misturas M3-L e M3-50%-L, respectivamente.

A tabela 38 e a figura 49 apresentam a resistência à compressão das argamassas pobre, mediana e rica de ambas as pesquisas, permitindo assim uma comparação entre seus resultados.

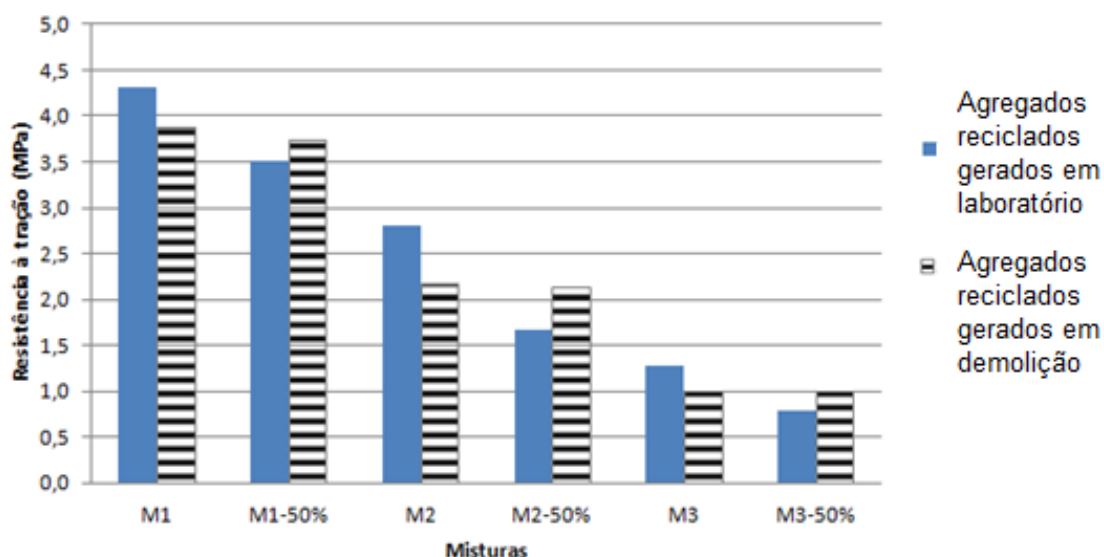


Figura 49 - Valores da resistência à tração das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo

Tabela 38 – Valores da resistência à tração das argamassas rica, mediana e pobre de Alves (2012) e do presente estudo

| Misturas | Resistência à tração (MPa) | DP | Variação percentual |
|-----------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| M1 – L | 4,32 | 0,13 | - |
| M1 | 3,88 | 0,38 | -10,2% |
| M1-50%-L | 3,51 | 0,06 | - |
| M1-50% | 3,75 | 0,22 | 6,8% |
| M2 – L | 2,81 | 0,11 | - |
| M2 | 2,17 | 0,27 | -22,8% |
| M2-50%-L | 1,67 | 0,01 | - |
| M2-50% | 2,14 | 0,24 | 28,1% |
| M3 – L | 1,28 | 0,11 | - |
| M3 | 1,01 | 0,12 | -21,1% |
| M3-50%-L | 0,78 | 0,02 | - |
| M3-50% | 1,00 | 0,11 | 28,2% |

De acordo com a tabela 38 e a figura 49, pode-se observar que a mistura de argamassa rica M1 sofreu uma redução na resistência à tração de 10,2% quando comparada à M1-L, enquanto a M1-50% apresentou um aumento de 6,8% em relação à M1-50%-L.

Nota-se também que a mistura de referência de argamassa mediana M2 sofreu uma redução de 22,8% em relação à mistura M2-L, enquanto na mistura M2-50% ocorreu um aumento na resistência à tração de 28,1% comparada à mistura M2-50%-L.

Como nas demais misturas de referência, na mistura de referência de argamassa pobre M3 ocorreu uma redução de 21,1% comparada à mistura M3-L. Já a mistura M3-50% apresentou um acréscimo de 28,2% em relação à mistura M3-50%-L.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Apesar do avanço nas pesquisas a respeito do uso de agregados reciclados e o aumento do processo de reciclagem de RCD no Brasil, o conhecimento sobre a influência dos agregados reciclados de RCD na produção de argamassas é ainda incipiente. Desta forma, este estudo buscou compreender melhor o comportamento de argamassas produzidas com a substituição parcial dos agregados naturais pelos reciclados.

Alguns procedimentos foram adotados com a finalidade de minimizar influências externas nos resultados, entre eles estão a separação dos resíduos de acordo com a cor predominante e a homogeneização do material. Outra medida adotada foi o uso de agregados reciclados com dimensão máxima similar a dos agregados naturais.

Notou-se que a granulometria do agregado reciclado obtida nos ensaios é satisfatória. Obteve-se módulo de finura muito próximo ao do agregado natural, além do diâmetro máximo ser equivalente para ambos. Além disso, o agregado reciclado apresentou-se mais bem graduado que o natural e, deste modo, era esperado obter melhor empacotamento nas misturas de argamassa com agregado reciclado.

Ainda em relação à caracterização dos agregados, foi observado que o agregado reciclado utilizado no estudo possui massa específica inferior à do agregado natural, o que induziu a acreditar que as misturas de argamassa com agregado natural possuiriam também menor massa específica que as misturas de referência. Entretanto, notou-se que todas as misturas de argamassa rica, mediana e pobre com agregados reciclados não apresentaram alteração da massa específica quando comparados às misturas de referência.

Em relação à trabalhabilidade, foi possível perceber que o empobrecimento das misturas de referência ocasionou uma redução da trabalhabilidade. A mistura de referência de argamassa pobre sofreu redução da trabalhabilidade; porém, mesmo possuindo uma grande quantidade de agregado, seu elevado fator água/cimento proporcionou uma menor redução desta propriedade. Já a mistura de referência de argamassa mediana sofreu uma maior redução que pode ter sido ocasionada pelo aumento na quantidade de agregados superior ao aumento no fator água/cimento.

Observou-se também que das misturas de argamassa rica com agregado reciclado apenas a mistura com 15% de substituição apresentou redução da trabalhabilidade, enquanto todas as misturas de argamassa mediana com agregado reciclado apresentaram acréscimo. As misturas de argamassa pobre com 25% e 50% de substituição também apresentaram aumento desta propriedade. Outra característica observada foi a boa aparência de todas as misturas, as quais não apresentaram segregação e exsudação e também não necessitaram da adição de superplastificante. Com tais resultados, percebe-

se que apenas a mistura M1-15% apresentou redução da trabalhabilidade, o que permite concluir que o uso de agregado reciclado não prejudica a trabalhabilidade das argamassas nos teores de 25% e 50%, podendo, inclusive, ocorrer um aumento na mesma.

Em relação ao ensaio de resistência à compressão, notou-se que o empobrecimento do traço das argamassas ocasiona uma perda de até 85% nas misturas de referência. Em todas as misturas de argamassa rica com agregado reciclado ocorreu redução da resistência à compressão; enquanto na argamassa mediana apenas a mistura com 50% de substituição apresentou redução. Já na argamassa pobre foi observado que a mistura com 25% de substituição apresentou acréscimo nesta propriedade. Desta forma, pode-se concluir que a substituição do agregado natural pelo reciclado na argamassa pobre até 50% e na argamassa mediana até 25% não prejudica a resistência à compressão das argamassas.

Quanto ao módulo de elasticidade, pode-se notar que a argamassa rica e a argamassa pobre não apresentaram modificação no módulo de elasticidade das misturas com agregado reciclado, enquanto todas as misturas de argamassa mediana apresentaram redução nesta propriedade. Deste modo, percebe-se que para a substituição parcial do agregado natural pelo reciclado na argamassa rica e pobre o resultado é positivo.

Em relação à tração por compressão diametral, o empobrecimento do traço das argamassas provocou uma progressiva redução dessa propriedade. Foi observado também que as misturas de argamassa rica e mediana com agregados reciclados não apresentaram variação da resistência à tração. Já a argamassa pobre apresentou redução para a mistura com 15% de substituição, acréscimo para a mistura com 25% e na mistura com 50% não ocorreu alteração. Assim, pode-se concluir que o resultado foi satisfatório para as argamassas rica e mediana, contudo inconclusivo para a argamassa pobre.

Em relação à absorção por capilaridade, foi observado que em todas as misturas ensaiadas ocorreu aumento da absorvidade nos poros médios, com exceção da mistura M2-25%. Já nos poros pequenos, quase todas as misturas de argamassa sofreram redução da absorvidade, com exceção das misturas de argamassa rica com 25% e 50% de substituição.

Quanto ao ensaio de absorção total das argamassas, foi notado que na argamassa rica ocorreu uma redução da massa específica e um acréscimo da absorção e do índice de vazios nas misturas com 25% e 50% de substituição. Já nas argamassas mediana e pobre ocorreu acréscimo na massa específica para as misturas com 25% e 50% e aumento da absorção e índice de vazios para todas as misturas com substituição.

Em relação à comparação realizada com o projeto de Alves (2012) pode-se notar que mesmo com a divergência citada entre os agregados reciclados, os resultados obtidos para as propriedades mecânicas foram muito próximos. Pode-se supor que a cura térmica adotada por Alves (2012) exerceu influência nos valores elevados das

propriedades mecânicas obtidos em um curto período no estudo da mesma. Outra explicação para esses valores é o fato de ter sido utilizado nas argamassas agregados com diferentes resistências e granulometria.

Pode-se concluir que para as misturas de argamassa rica o aumento na absorção e a redução na massa específica proporcionaram um acréscimo na porosidade que pode ter ocorrido devido ao aumento da absorção nos poros médios. Por ser poroso, supostamente o agregado absorveu uma parcela da água presente na mistura durante o processo de hidratação e como o fator água cimento é baixo, especula-se que a hidratação não foi completa. Desta forma, pode-se explicar a perda observada na resistência à compressão das misturas de argamassa rica com agregado reciclado.

Na argamassa mediana, observou-se que nas misturas com 15% de substituição ocorreu um acréscimo da absorção e que a massa específica e a resistência não sofreram alteração. Uma possível explicação para este resultado é o aumento da absorção ser atribuída ao consumo de água do agregado, o que não iria alterar a microestrutura da pasta e a resistência das misturas. Já para o teor de 25%, o aumento da absorção atrelado ao aumento da massa específica e a não alteração da resistência indica um refinamento na mistura. O acréscimo na absorção pode ter sido ocasionado pelo agregado reciclado ser mais poroso, o que pode ser notado pelo fato da absorvidade ter reduzido tanto nos poros médios como nos pequenos. Nas misturas com 50% de substituição, mesmo com o aumento da massa específica que poderia indicar o refinamento na mistura, ocorreu aumento na absorvidade dos poros médios, o que pode explicar a perda na resistência à compressão e a alteração na microestrutura. Pode-se concluir que até 25% de substituição na argamassa mediana o resultado obtido é satisfatório.

Na argamassa pobre com 15% de substituição foi observado o mesmo comportamento da mistura de argamassa mediana com 15%, ou seja, ocorreu um aumento da absorção e a não alteração da massa específica e da resistência à compressão. Acredita-se também que o aumento da absorção pode ser atribuído ao elevado consumo de água do agregado, sem alterar a microestrutura da pasta e resistência. Já a mistura com 25% apresentou acréscimo na absorção, na massa específica e na resistência. O acréscimo da resistência pode ser explicado por uma melhoria na aderência entre os agregados e a pasta na zona de transição. As misturas de argamassa pobre com 50% de substituição apresentou comportamento semelhante ao da argamassa mediana com 25%, ou seja, acréscimo da absorção e da massa específica e a não alteração na resistência, o que indica que ocorreu um refinamento na mistura. Desta forma, conclui-se que o resultado para as misturas de argamassa pobre foi satisfatório para todos os teores de substituição ensaiados.

Com base nas informações apresentadas neste estudo, pode-se perceber que a reciclagem é uma das mais destinações mais benéficas que pode ser atribuída aos resíduos de construção e demolição e a utilização dos agregados reciclados na produção de argamassas pode se apresentar viável técnica e economicamente. Os resultados obtidos nos ensaios comprovaram que o agregado reciclado não afeta todas as

propriedades das argamassas e o desempenho das mesmas é função do traço adotado e do teor de substituição do agregado natural pelo reciclado. São recomendados outros ensaios para verificar a completa viabilidade desses agregados como materiais de construção e, desta forma, possibilitar sua inserção no mercado.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta pesquisa foram estudadas algumas características dos agregados e das argamassas, entre as quais estão a granulometria, a massa específica dos agregados, o espalhamento, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a resistência à tração, a absorção por capilaridade, o índice de vazios, a absorção total e a massa específica das argamassas. Entretanto, sugere-se realizar outros ensaios como o de permeabilidade à água e a gás e de compactação das misturas.

É relevante também realizar uma análise do comportamento reológico e a caracterização física através de estudo microscópico, de forma, rugosidade e resistência à compressão dos agregados naturais e reciclados empregados no estudo. Desta forma, será possível compreender a influência dos agregados reciclados no desempenho das argamassas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, A.; FATHIFAZL, G; FOURNIER, B.; ISGOR, O. B.; ZAVADIL, R.; RAZAQPUR, A. G.; FOO, S. “Quantification of residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis”. **Materials Characterization** vol. 60, nº 7, pp. 716–728, 2009.

ABRECON. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição, São Paulo, SP, 2013. Disponível em: <www.abrecon.org.br> Acesso em: 12 dez. 2014.

ALAVEDRA, P.; DOMINGUEZ, J.; GONZALO, E.; et al. “La construction sostenible. El estado da la Cuestion.” **Informes de la Construction**, v.49, nº 451, pp. 41-47, 1997.

ALVES, L.A., 2012, *Influência de Agregados Miúdos Reciclados de Argamassas no Comportamento Mecânico de Argamassas de Cimento Portland*. Projeto de Graduação, Escola Politécnica/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ANGULO, S. C., 2000, *Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados*. Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica/ USP, São Paulo, SP, Brasil.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V.M. “Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil”. In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem na construção civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações. São Paulo, Jun/2001.

ANGULO, S. C., 2005, *Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de suas Características no Comportamento Mecânico dos Concretos*. Tese de D. Sc., Escola Politécnica/ USP, São Paulo, SP, Brasil.

ANGULO, S.C.; JOHN, V.M. “Normalização dos agregados graúdos de re- síduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade”. In: IX Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. Foz do Iguaçu, 2002.

BASTOS FILHO, A. I. R., 2005, *Reciclagem da Parte Mineral do Resíduo de Construção Civil e Demolição como Agregado na Confecção de Concreto de Cimento Portland (CP) de Uso Estrutural: Uma Alternativa ao Uso indiscriminado do seixo rolado no município de Manaus*. Monografia (Pós graduação) – Faculdade de Tecnologia/ UFAM, Manaus, AM, Brasil.

BODI, J., “Experiência Brasileira com Entulho Reciclado na Pavimentação”. In: Reciclagem na Construção Civil, Alternativa Econômica para a Proteção Ambiental, pp. 56-63, São Paulo, 1997.

BOURSCHEID, A. B.; SOUZA, R. L. **Resíduos de construção e demolição como material alternativo**. 1ª edição. Florianópolis, Publicações do IF-SC, 2010.

BRITO FILHO, J.A., “Cidade Versus Entulho”. In: II Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, pp 56-67. São Paulo, 1999.

BUTLER, A. M., 2003, *Concreto com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados*. Dissertação de M. Sc., Escola de Engenharia de São Carlos/ USP, São Carlos, SP, Brasil.

CABRAL, A.E.B., 2007, *Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD*. Tese de D. Sc., Escola de Engenharia de São Carlos/ USP, São Carlos, SP, Brasil.

CAGGIANO, A.; ETSE, G.; MARTINELLI, E. “Zero-thickness interface model formulation for failure behavior of fiber-reinforced cementitious composites”. **Computers & Structures** n.98: pp. 23–32, 2012.

CALCADO, G. C. S.; FERREIRA, J. C., 2013, *Influência de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em argamassas de cimento Portland*. Relatório CNPQ/PIBIC. Rio de Janeiro, Escola Politécnica/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CARIJÓ, P. M., 2005, *Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*. Dissertação de M. Sc., Escola de Engenharia de São Carlos/ USP, São Carlos, SP, Brasil.

CARNEIRO, F. P., 2005, *Diagnóstico e ações da atual situação dos Resíduos de construção e demolição na cidade do Recife*. Dissertação de M. Sc., UFPB; João Pessoa, PB, Brasil.

COIMBRA, M. A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M. R., Utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão em argamassas e concretos de cimento Portland. *Revista Cerâmica*, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v50n316/a0450316.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2014.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE), Resolução n° 307, de 5 de julho de 2002: Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil, julho, 2002.

CORDEIRO, G. C., 2006, *Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CORINALDESI, V., MORICONI, G. “Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate”. **Construction and Building Materials**, v.23, pp. 289–294, 2009.

COSTA, N., “Planejamento de programas de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: uma análise multivariada”. **Revista Engenharia Sanitária**, v. 12, n. 4, pp. 446-456, 2007.

CYRINO, A. B.; ALMEIDA, A. A decolagem das multinacionais brasileiras. Fundação Dom Cabral, 2007. Disponível em: <<http://www.fdc.org.br/professorespesquisa/publicacoes/Paginas/publicacao-detalhe.aspx?publicacao=18126>> Acesso em: 06 jan 2014.

DE LARRARD, F., *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, Modern Concrete Technology Series, v. 9, E&FN SPON, London, 1999.

DHIR, R. K.; LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T. “Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes.” **Proceedings of the ICE- Structures and Buildings**, v.134, pp. 257-274, 1999.

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

DNIT 083:2006 - Tratamento de trincas e fissuras - Especificação de serviço.

DORSTHORST, B.J.H; HENDRIKS, Ch. F. “Re-use of construction and demolition waste in the EU”. In: CIB Symposium: Construction and Environment – theory into practice. São Paulo, 2000.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARI, A; BARRA, M. “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete”. **Cement and Concrete Research**, v. 37, pp. 735–742, 2007.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. “Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates”. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, pp. 9–14, 2010.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. “Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates”. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, pp. 397–401, 2007.

FERREIRA, A. B. H. Novo Aurélio do Século XXI: o dicionário da Língua Portuguesa. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira. 1999.

FERREIRA, L.; BRITO, J., BARRA, M. “Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties”. **Maganize of Concrete Research**, v. 63, issue 8, pp. 617–627, 2011.

FONSECA, N.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. “The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste”. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, pp. 637-643, 2011.

FONTES, C. M. A., 2008, *Utilização das Cinzas de Lodo de Esgoto e de Resíduo Sólido Urbano em Concretos de Alto Desempenho*, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GOKCE, A.; NAGATAKI, S.; SAEKI, B.; HISADA, M. “Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete”. **Construction and Building Materials**; v. 25, pp. 2426–231, 2011.

GONÇALVES, J. P., 2005, *Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GUNTHER, W. M. R. “Minimização de resíduos e educação ambiental”. In: Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. Curitiba, 2000.

HANSEN, T. C. “Recycling of demolished concrete and masonry”. **Chapman & Hall**, 316p. Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. London, 1992.

HASABA, S.; KAWAMURA, M.; TORLI, K.; TAKEMOTO, K. “Drying shrinkage and durability of concrete made from recycled concrete aggregates”. **Japan Concrete Institute**, v.3, pp. 55–60, 1981.

JAZRA, G. “BNDES concede R\$ 2,5 milhões a pesquisa para produção de cimento com resíduos da construção civil”. PINI, 2013. Disponível em: <<http://piniweb.pini.com.br/construcao/tecnologia-materiais/bndes-concede-r-25-milhoes-a-pesquisa-para-producao-de-278756-1.aspx>> Acesso em: 15 jan. 2015.

JOHN, V. M.; CAVALCANTE, J. R. “Conclusões”. In: Workshop Reciclagem de Resíduos como Materiais de Construção Civil. São Paulo, 1996.

JOHN, V. M., 2000, *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. Tese (livre docência), Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Brasil.

KWAN, W. H.; RAMLI, M.; KAM, K. J.; SULIEEMAN, M.Z. “Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties”. **Construction and Building Materials**, v. 26, pp.565-573, 2011.

KIKUCHI, M.; YASUNAGA, A; EHARA, K. “The total evaluation of recycled aggregate and recycled concrete”. In: International Rilem Symposium, Odense, Dinamarca, 1993.

LEAL, U. “Sobras que valem uma obra”. **TECHNE: Revista de Tecnologia da Construção**, v. 10, n. 55, pp. 10-14, 2001.

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

LEITE, M. B., 2001, *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Tese de D. Sc., UFRGS, Rio Grande do Sul, Brasil.

LEVY, S. M., 1997, *Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos*. Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Brasil.

LEVY, S.M. Problemas gerados pelo entulho. Maio, 2000. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/textos/Problemas%20gerados%20pelo%20Entulho.pdf>> Acesso em: 01 out. 2014.

LIMA, F. S. N. S., 2005, *Aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de argamassas*. Dissertação de M. Sc., Centro de Tecnologia/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

LUZ, A.; ALMEIDA, S., 2012, *Manual de Agregados para a Construção Civil –2ª edição*. Centro de Tecnologia Mineral–CETEM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MARQUES NETO, J.C., 2009, *Estudo da gestão municipal dos resíduos de construção e demolição na Bacia Hidrográfica do Turvo Grande*. Tese de D. Sc., Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, SP, Brasil.

MEFTEH, H., et. al., 2013 “Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete”. **Journal of Cleaner Production**, prod. 54, pp. 282-288.

MEIRELLES, A. “TAC determina que o descarte de resíduos tenha monitoramento on-line”. Globo.com, 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2014/08/tac-determina-que-o-descarte-de-residuos-tenha-monitoramento-online.html>> Acesso em: 30 out. 2014

MICROMETICS. “Densidade”. Disponível em: <<http://micrometics.com.br/site/produtos/densidade/>> Acesso em: 16 nov. 2014

MIRANDA, L. F. R., 2000, *Estudo de Fatores que Influem na Fissuração de Revestimentos de Argamassa com Entulho Reciclado*. Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Brasil.

MIRANDA, L. F. R., 2005, *Contribuição ao Desenvolvimento da Produção e Controle de Argamassas de Revestimento com Areia Reciclada Lavada de Resíduos Classe A da Construção Civil*. Tese de D. Sc., Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Brasil.

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

MOLL, S.; BRINGEZU, S.; SCHUTZ, H. “Resource use in European countries – material flows and resource management”. **Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy**, Wuppertal, Alemanha, 2005.

MUELLER, A. Closed Loop of Concrete Rubble Bauhaus Universitat Weimar. Disponível em: www.uniweimar.de/Bauing/aufber/Lehre/Gastvorlesung/Barcelona/Lecture07.pdf Acesso em: 28 nov. 2014.

MULDER, E.; et al., “Immobilisation of PAH in waste materials”. In: Waste Materials in Constructions. Inglaterra, 2000.

NAGATAKI, S.; GOKCE, A.; SAEKI, T.; HISADA, M. “Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates”. Cement and Concrete Research, v. 34, pp. 965–971, 2004.

NBR 15112:2004 - Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação.

NBR 15113:2004 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação.

NBR 15114:2004 - Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação.

NBR 15115:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.

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

NBR 248:2003 – Agregados - Determinação da Composição Granulométrica.

NBR 7215:1996 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

NBR 8522:2008 – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

NBR 7222:2011 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

NBR 9779:2012 – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.

NBR 9778:2005 – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

NENO, C. J. F., 2010, *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão*. Dissertação de M. Sc., Instituto Superior Técnico/Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

OIKONOMOU, N. D., “Recycled concrete aggregates”. **Cement & Concrete Composites**, V.27, pp. 315–318, 2005.

PALIARI, J. C.; Avaliação das perdas de concreto usinado nos canteiros de obras. São Paulo: ANTAC, 2002.

PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D.; MARTINELLI, E.; KOENDERS, E. A. B. “Designing Concrete with recycled ecological aggregates”. In: Proceeding of SB13 Coventry. Coventry, Reino Unido, 2013.

PERA, J. “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. São Paulo, 1996.

PIMENTEL, L. L.; LINTZ, C. C. R.; SACRAMENTO, W.; ARAUJO, R. “Utilização de resíduos da construção para a produção de argamassa de revestimentos”. In: 49º Congresso Brasileiro de Concreto IBSN 97885, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2007.

PINTO, T. P., 1986, *Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas*. Dissertação de M. Sc., Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos/USP, São Carlos, SP, Brasil.

PINTO, T. P., 1999, *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. Tese de D. Sc., Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Brasil.

PINTO, V. F. S., 2013, *Gestão de Resíduos de Construção e Demolição – Parque Tecnológico de Negócios e de Ourivesaria de Gondomar*. Relatório de Estágio, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território/Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

QUEBAUD, M. R.; BUYLE-BODIN, F. “A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados no concreto”. In: Congresso Brasileiro de Cimento (CBC). São Paulo, 1999.

ROMA, J. C.; MOURA, A. A., “Resíduos da Construção Civil”. **Caderno de Diagnóstico, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, 2011.

SAGOE-CRENTSIL, K.; TAYLOR, A.; BROWN, T. “Properties of concrete incorporating fly ash and recycled demolition waste”. In: *Materials and Technologies for sustainable construction – CIB World Building Congress*, v.1, pp. 443-449, 1998.

SANTOS, I. R.; FRIEDRICH, A.C.; IVAR, J. A. “Marine debris contamination along undeveloped tropical beaches from northeast Brazil”. *Environmental Monitoring Assessment*, 2008.

SINDUSCON. **MANUAL SOBRE OS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Fortaleza, 2011. Disponível em: < <http://www.sinduscon-ce.org/ce/downloads/pqvc/Manual-de-Gestao-de-Residuos-Solidos.pdf>> Acesso em: 04 dez. 2014.

SILVA, V. G. “Avaliação do desempenho ambiental de edifícios”. *Qualidade na Construção*. São Paulo, n. 25, pp. 14-22, 2000.

SOUZA, J. G. G., 2001, *Contribuição ao Estudo da Relação entre Propriedades e Proporcionamento de Blocos de Concreto: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado*. Dissertação de M. Sc., Escola de Engenharia/UnB, Brasília, Brasil.

SOUZA, V. B., 2005, *Avaliação da Geração de Entulho em Conjunto Habitacional Popular – estudo de caso*. Dissertação de M. Sc., UFU, Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

TELLES, J. “Escombros de prédio implodido no Hospital da UFRJ ainda não foram recolhidos na Ilha do Fundão”. *Globo.com*, 2011. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/rio/escombros-de-predio-implodido-no-hospital-da-ufrj-ainda-nao-foram-recolhidos-na-ilha-do-fundao-2801119>> Acesso em: 03 ago. 2014.

XIAO, J.; LI, W., CORR, D.J.; SHAH, S.P. “Effects of interfacial transition zones on the stress–strain behaviour of modelled recycled aggregate concrete”. **Cement and Concrete Research**, v. 52, pp. 82–99, 2013.

YONG, P.C.; TEO D.C.L., “Utilization of Recycled Aggregate as Coarse Aggregate in Concrete”, **UNIMAS E-Journal of Civil Engineering**, v. 1, issue 1, pp 1-6, 2009.

WEDLER, B.; HUMMEL, A. “Trummerverwertung und Ausbau Von brandruinen” **Wilhelm Ernest & Sohn**. Berlin, 1946.

ZORDAN, S. E., 1997, *A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto*. Dissertação de M. Sc., FEC/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.