



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

NEUBER NASCIMENTO DE ARAÚJO

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO PRODUZIDAS COM
AGREGADOS RECICLADOS ORIUNDOS DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO DA GRANDE NATAL-RN**

NATAL - RN
2014

NEUBER NASCIMENTO DE ARAÚJO

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
PRODUZIDAS COM AGREGADOS RECICLADOS ORIUNDOS DO
RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DA GRANDE NATAL-
RN**

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

Orientadora: Prof^a. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

NATAL-RN

2014

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Araújo, Neuber Nascimento de.

Desempenho de argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da grande Natal-RN. / Neuber Nascimento de Araújo. – Natal, RN, 2014.
129 f.; il.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Argamassa de revestimento - Dissertação. 2. Resíduos de construção - Dissertação. 3. Agregado reciclado - Dissertação. 4. Sismo – Dissertação. I. Sá, Maria das Vitórias Vieira Almeida de. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

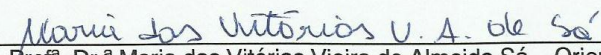
CDU 691.53

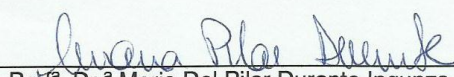
NEUBER NASCIMENTO DE ARAÚJO

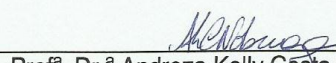
**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM
AGREGADOS RECICLADOS ORIUNDOS DO RESÍDUO DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DA GRANDE NATAL/RN**

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

BANCA EXAMINADORA


Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira de Almeida Sá – Orientadora (UFRN)


Prof.^a Dr.^a Maria Del Pilar Durante Ingunza – Examinadora Interna à Instituição
(UFRN)


Prof.^a Dr.^a Andreza Kelly Costa Nóbrega – Examinadora Externa à Instituição
(UFERSA)

Natal, 28 de março de 2014.

DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO PRODUZIDAS COM AGREGADOS RECICLADOS ORIUNDOS DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DA GRANDE NATAL-RN

Neuber Nascimento de Araújo

Orientadora: Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

RESUMO

A indústria da construção civil é responsável por gerar uma grande quantidade de resíduos em função de suas atividades, ocasionando problemas ambientais, econômicos e sociais. Diante dessa problemática, alguns estudos vêm sendo realizados com o objetivo de desenvolver tecnologias e alternativas de reciclagem para os resíduos de construção e demolição (RCD), motivados pela escassez de recursos naturais e pela diminuição dos problemas ambientais gerados. A pesquisa tem por objetivo caracterizar os agregados reciclados produzidos na Grande Natal-RN e analisar o desempenho de argamassas de revestimento produzidas com estes agregados. O estudo inclui a caracterização química, física e microestrutural dos agregados reciclados, assim como a realização de análises microscópicas e ensaios laboratoriais das argamassas no estado fresco (índice de consistência, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (resistência a compressão, resistência a tração na flexão, absorção de água por imersão e por capilaridade, densidade de massa e índice de vazios), para argamassas produzidas a partir de diferentes teores de substituição de agregados (0, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%). Os resultados obtidos foram satisfatórios, proporcionando às argamassas produzidas com agregados reciclados, valores menores de densidade de massa e módulo de elasticidade dinâmico, assim como um incremento nos índices de absorção e porosidade. A resistência à tração na flexão e à compressão para o traço TP1 (1:2:8) foram inferiores para as argamassas produzidas com agregados reciclados e o melhor resultado foi para 20% de substituição. Para o traço TP2 (1:8), ocorreu um incremento na resistência à tração e à compressão e o melhor resultado foi para 100% de substituição dos agregados naturais pelos reciclados. Os experimentos conduziram a concluir que do ponto de vista técnico, as argamassas produzidas com agregados reciclados podem ser utilizadas na construção civil, desde que haja um controle eficiente nos processos de produção do agregado reciclado e na dosagem das argamassas.

Palavras chaves: Argamassas de revestimento, resíduos de construção, agregado reciclado.

**PERFORMANCE OF MORTAR COATING PRODUCED WITH RECYCLED
AGGREGATES DERIVED FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE
(CDW) PRODUCED IN THE GRANDE NATAL-RN**

Neuber Nascimento de Araújo

Adviser: Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

ABSTRACT

The construction industry is responsible for generating a lot of waste because of their activities. Consequently, it is noticeable the occurrence of environmental problems in terms of its disposal in inappropriate places. Faced with this problem, some studies have been conducted with the aim of developing technologies and alternatives for recycling construction and demolition waste (CDW), motivated by the scarcity of natural resources and reduction of environmental problems generated. The research aims to characterize the recycled aggregates derived from construction and demolition waste (CDW) produced in the Greater Natal-RN and analyze the performance of mortar coating produced with recycled aggregates. The study includes the chemical, physical and microstructural characterization of recycled aggregates, as well as conducting microscopic analysis and laboratory tests in the fresh state (consistency index, water retention, bulk density and content of entrained air) and in the hardened state (compressive strength, tensile strength in bending, water absorption by immersion and capillary, mass density and void ratio) for mortars produced from different levels of substitution of aggregates (0, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % and 100 %). The results were satisfactory, providing mortars produced with recycled aggregates, smaller mass density and dynamic modulus values as well as an increase in the rates of absorption and porosity. The tensile strength in bending and compression for TP1 (1:2:8) trait were lower for mortars produced with recycled aggregates and the best result was 20% for replacement. For the TP2 (1:8) mapping, there was an increase in resistance to traction and compression and the best result was for 100% replacement of natural aggregates by recycled. The experiments led to the conclusion that the technical and economic point of view that the mortars produced with recycled aggregates can be used in construction, only if there is an effective control in production processes of recycled aggregate and at the dosage of mortars.

Key words: Mortars coating, construction waste, recycled aggregate.

“Um homem precisa viajar para lugares que não conhece para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como o imaginamos, e não simplesmente como é ou pode ser. Que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos, e simplesmente ir ver”.

Amyr Klink

AGRADECIMENTOS

Nossos objetivos e conquistas muitas vezes não se devem apenas ao nosso esforço pessoal e sim pela colaboração de muitas pessoas. A realização desta pesquisa contou com o auxílio e o apoio de professores e amigos que tive o privilégio de conviver. Por isso, gostaria de agradecer a algumas pessoas que estiveram comigo durante esses dois anos.

- A Deus, pela proteção divina e por me guiar em todos os momentos da minha vida;
- Aos meus pais e a todos os meus familiares, pelas palavras de incentivo, pelo carinho e apoio diário, e principalmente por me dar força suficiente para que eu atinja os objetivos que almejo;
- A minha orientadora Prof^a Maria das Vitórias, pelo auxílio desde a sugestão do tema até a conclusão da pesquisa, pela devida atenção nos momentos de orientação, pela confiança depositada e pela sólida contribuição ao desenvolvimento da pesquisa;
- A Professora Andreza Kelly Costa Nóbrega pelo auxílio na realização de alguns ensaios e pelas trocas de informações durante a realização da pesquisa;
- A Professora Jaquéligia Brito da Silva, pelo conhecimento compartilhado em todos os momentos que a procurei, pelas palavras de incentivo e pela parceria desenvolvida nas pesquisas das disciplinas do mestrado;
- A todos os Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC), em especial ao Professor Olavo e Professor Paulo Alysson;
- Ao Departamento de Engenharia de Materiais pela realização de grande parte dos ensaios de caracterização dos materiais;
- Aos bolsistas Rísia Amaral, Isabela Beatriz, Rayanne Câmara e Caroliny Azevedo, pelo auxílio, empenho e dedicação depositados para a realização dos ensaios de laboratório;
- Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção da UFRN, Francisco Braz (Seu Chico) e Sandro Ricardo, pela contribuição nos ensaios de laboratório;

- Aos amigos do mestrado Ravenna Barros, pelos estudos em grupo, pela parceria nas pesquisas e pelo convívio diário e Artur Moura, pelas trocas de informações e atividades em grupo junto às disciplinas do PEC;
- À Rafaela Xavier pela presteza, simpatia e trabalho desenvolvido na Secretaria do PEC;
- Ao REUNI – Programa de Apoio ao Plano de Reestruturação e Expansão das Universidades Federais pela bolsa de estudo e apoio a esta pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Estrutura da gestão de resíduos (CONAMA)	2
Figura 2.1 Composição do RCD gerado em Natal-RN	11
Figura 2.2 Resíduo Cinza.....	12
Figura 2.3 Resíduo Vermelho.....	12
Figura 2.4 Britadores	15
Figura 2.5 Agregado reciclado	15
Figura 2.6 Camadas do sistema de revestimento	27
Figura 3.1 Fluxograma das etapas 01 e 02 da metodologia experimental	37
Figura 3.2 Fluxograma das etapas 03 e 04 da metodologia experimental	38
Figura 3.3 Agregado reciclado com a granulometria obtida na usina de reciclagem	44
Figura 3.4 Agregado reciclado peneirado.....	45
Figura 3.5 Equipamento Shimadzu - modelo Autograph AG-X	52
Figura 3.6 Corpo-de-prova em ensaio de tração na flexão	53
Figura 4.1 Análise química (FRX) dos agregados naturais	62
Figura 4.2 Análise química (FRX) dos agregados reciclados.....	63
Figura 4.3 Análise mineralógica (DRX) dos agregados reciclados.....	64
Figura 4.4 MEV do agregado natural (100x)	65
Figura 4.5 MEV do agregado natural (600x)	66
Figura 4.6 MEV do agregado reciclado (600x)	66
Figura 4.7 MEV do agregado reciclado (500x)	67
Figura 4.8 Distribuição granulométrica dos agregados naturais e reciclados.....	71
Figura 4.9 Índices de consistência para as formulações TP1 e TP2.....	72
Figura 4.10 Relação a/c para as formulações TP1 e TP2	73
Figura 4.11 Densidade de massa das argamassas no estado fresco para as formulações TP1 e TP2.....	75
Figura 4.12 Densidade de massa das argamassas no Estado Endurecido para as formulações TP1 e TP2.....	76
Figura 4.13 Resistência à compressão das argamassas para a formulação TP1	77
Figura 4.14 Resistência à compressão das argamassas para a formulação TP2	78
Figura 4.15 Resistência à tração na flexão das argamassas para a formulação TP1	80

Figura 4.16 Resistência à tração na flexão das argamassas para a formulação TP2	80
Figura 4.17 Espalhamento obtido para o ensaio de Índice de Consistência	82
Figura 4.18 Densidade de massa das argamassas no estado fresco	83
Figura 4.19 Teor de ar incorporado das argamassas	84
Figura 4.20 Retenção de água para as argamassas	85
Figura 4.21 MEV para argamassa padrão para uma ampliação de 200x	87
Figura 4.22 EDS para argamassa padrão	88
Figura 4.23 MEV para argamassa com substituição de 40% para uma ampliação 200x	89
Figura 4.24 EDS para argamassa com substituição de 40%	89
Figura 4.25 MEV para argamassa com substituição de 60% para uma ampliação ...	90
Figura 4.26 EDS para argamassa com substituição de 60%	91
Figura 4.27 MEV para argamassa com substituição de 100% para uma ampliação 200x	91
Figura 4.28 EDS para argamassa com substituição de 100%	92
Figura 4.29 Densidade de massa no estado endurecido	93
Figura 4.30 Absorção de água por capilaridade aos 10 min	95
Figura 4.31 Absorção de água por capilaridade aos 90 min	96
Figura 4.32 Coeficiente de capilaridade	97
Figura 4.33 Índice de Vazios obtidos para as argamassas produzidas para diferentes percentuais de substituição dos agregados naturais pelos reciclados	98
Figura 4.34 Absorção de água das argamassas produzidas para diferentes percentuais de substituição dos agregados naturais pelos reciclados	99
Figura 4.35 Módulo de elasticidade dinâmico	100
Figura 4.36 Resistência a tração na flexão obtida aos 7 e 28 dias	101
Figura 4.37 Valores de resistência à compressão obtidos aos 7 e 28 dias	103

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 Cálculo da massa específica.....	46
Equação 3.2 Cálculo da massa unitária.....	47
Equação 3.3 Cálculo da densidade de massa.....	51
Equação 3.4 Cálculo da resistência à tração na flexão.....	52
Equação 3.5 Cálculo da resistência à compressão.....	52
Equação 3.6 Cálculo da densidade de massa.....	53
Equação 3.7 Cálculo do teor de ar incorporado.....	55
Equação 3.8 Cálculo da densidade de massa teórica.....	55
Equação 3.9 Cálculo da retenção de água.....	56
Equação 3.10 Cálculo do módulo de elasticidade dinâmico.....	58
Equação 3.11 Cálculo da absorção de água.....	59
Equação 3.12 Cálculo do índice de vazios.....	59
Equação 3.13 Cálculo da massa específica.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Normas da ABNT voltadas das para o RCD	8
Tabela 2.2 Destinações dos materiais não britados.....	14
Tabela 2.3 Classificação das argamassas em função da retenção de água.....	29
Tabela 2.4 Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado fresco.....	30
Tabela 2.5 Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado endurecido	31
Tabela 2.6 Classificação das argamassas em função da resistência à compressão	33
Tabela 2.7 Classificação das argamassas em função da resistência à tração na flexão.....	33
Tabela 2.8 Classificação das argamassas em função da resistência potencial de aderência à tração.....	34
Tabela 3.1 Caracterização Química do Cimento CP II - Z 32 RS.....	39
Tabela 3.2 Caracterização Física do Cimento CP II - Z 32 RS	40
Tabela 3.3 Caracterização Mecânica do Cimento CP II - Z 32 RS.....	40
Tabela 3.4 Caracterização Química da Cal CH - I	41
Tabela 3.5 Caracterização Física e Granulométrica da Cal CH - I.....	42
Tabela 3.6 Formulação do traço TP1 (1:2:8).....	48
Tabela 3.7 Formulação do traço TP2 (1:8).....	48
Tabela 4.1 Granulometria e características físicas dos agregados naturais	69
Tabela 4.2 Granulometria e características físicas dos agregados reciclados	70
Tabela 4.3 Classificação para os índices de retenção de água	86
Tabela 4.4 Valores para classificação das argamassas em função da densidade de massa.....	94
Tabela 4.5 Classificação das argamassas em função do coeficiente de capilaridade	97
Tabela 4.6 Classificação para resistência à tração na flexão.....	102
Tabela 4.7 Classificação para resistência a compressão	103

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AN	Agregado natural
AR	Agregado reciclado
CH	Cal hidratada
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
EPSR	Poliestireno expandido reciclado
FRX	Fluorescência de raios X
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Política Nacional de resíduos sólidos
RCD	Resíduo de construção e demolição
RN	Rio Grande do Norte
SNSA	Secretaria Nacional de Meio Ambiente
TP1	Traço preliminar 1
TP2	Traço preliminar 2
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE EQUAÇÕES	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xiv
CAPITULO 1	1
1. Introdução	1
1.1 Relevância.....	4
1.2 Justificativa.....	4
1.3 Objetivos da Pesquisa.....	5
CAPÍTULO 2	6
2. Fundamentação Teórica	6
2.1 Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	6
2.2 Legislação	7
2.3 Agregados reciclados.....	9
2.3.1 Separação e Triagem	11
2.3.2 Produção dos agregados reciclados.....	13
2.4 Destinações para os agregados reciclados.....	15
2.5 Argamassas	17
2.5.1 Definição.....	17
2.5.2 Materiais constituintes das argamassas	17
2.5.3 Classificação das Argamassas	23
2.5.4 Argamassas de revestimento	25
2.5.5 Propriedades das argamassas no Estado Fresco	28
2.5.6 Propriedade das argamassas no Estado Endurecido.....	31
2.6 Produção de argamassas com agregados reciclados.....	35

CAPITULO 3	37
3. Metodologia Experimental.....	37
3.1 Caracterização dos Materiais	39
3.1.1 Materiais	39
3.1.2 Análises e ensaios dos agregados naturais e reciclados	43
3.2 Formulação das argamassas e definição dos Teores de Substituição.....	47
3.2.1 Definição dos traços	47
3.2.2 Preparo das Argamassas	49
3.3 Ensaio Preliminares.....	49
3.3.1 Argamassas no Estado Fresco.....	50
3.3.2 Propriedades das argamassas no Estado Endurecido	51
3.4 Ensaio Definitivos	54
3.4.1 Estado Fresco.....	54
3.4.2 Propriedades das argamassas no Estado Endurecido	57
CAPITULO 4	61
4 Resultados e Discussão.....	61
4.1 Caracterização dos Agregados	61
4.1.1 Análise Química dos agregados naturais e reciclados	61
4.1.2 Análise Mineralógica dos agregados reciclados	64
4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	65
4.1.4 Análise Granulométrica	68
4.2 Ensaio Preliminares.....	72
4.2.1 Propriedades das argamassas no Estado Fresco	72
4.2.2 Propriedades das argamassas no Estado Endurecido	75
4.2.3 Análise da Etapa Preliminar.....	81
4.3 Ensaio Definitivos	82
4.3.1 Propriedades das Argamassas no Estado Fresco	82

4.3.2	Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido.....	86
CAPITULO 5		105
5	Conclusão	105
CAPITULO 6		107
6	Sugestões para trabalhos futuros.....	107
Referências		108

CAPITULO 1

1. Introdução

A indústria da Construção Civil é responsável por gerar uma quantidade elevada de resíduos sólidos, proporcionando um alto consumo energético, contribuindo para o aumento da poluição atmosférica, ruído e utilização dos recursos naturais. Neste sentido, há uma gradativa necessidade de amenizar os impactos ambientais, associados ao setor da construção civil, seja na fase de produção de materiais e componentes de edificações, seja na construção, no uso e na demolição da mesma.

No Brasil, dispomos da Resolução nº 307 do CONAMA (Brasil, 2002), que entrou em vigor em Janeiro de 2003 com o objetivo de disciplinar e orientar sobre a destinação dos resíduos de construção. Condizente a esta resolução, temos que a política urbana de pleno desenvolvimento da função social da cidade e da propriedade urbana obriga todos os municípios a efetivar a destinação ambientalmente correta aos resíduos de construção e demolição.

A estrutura da gestão de resíduos a partir da resolução 307 do CONAMA (2002) está apresenta na Figura 1.1.

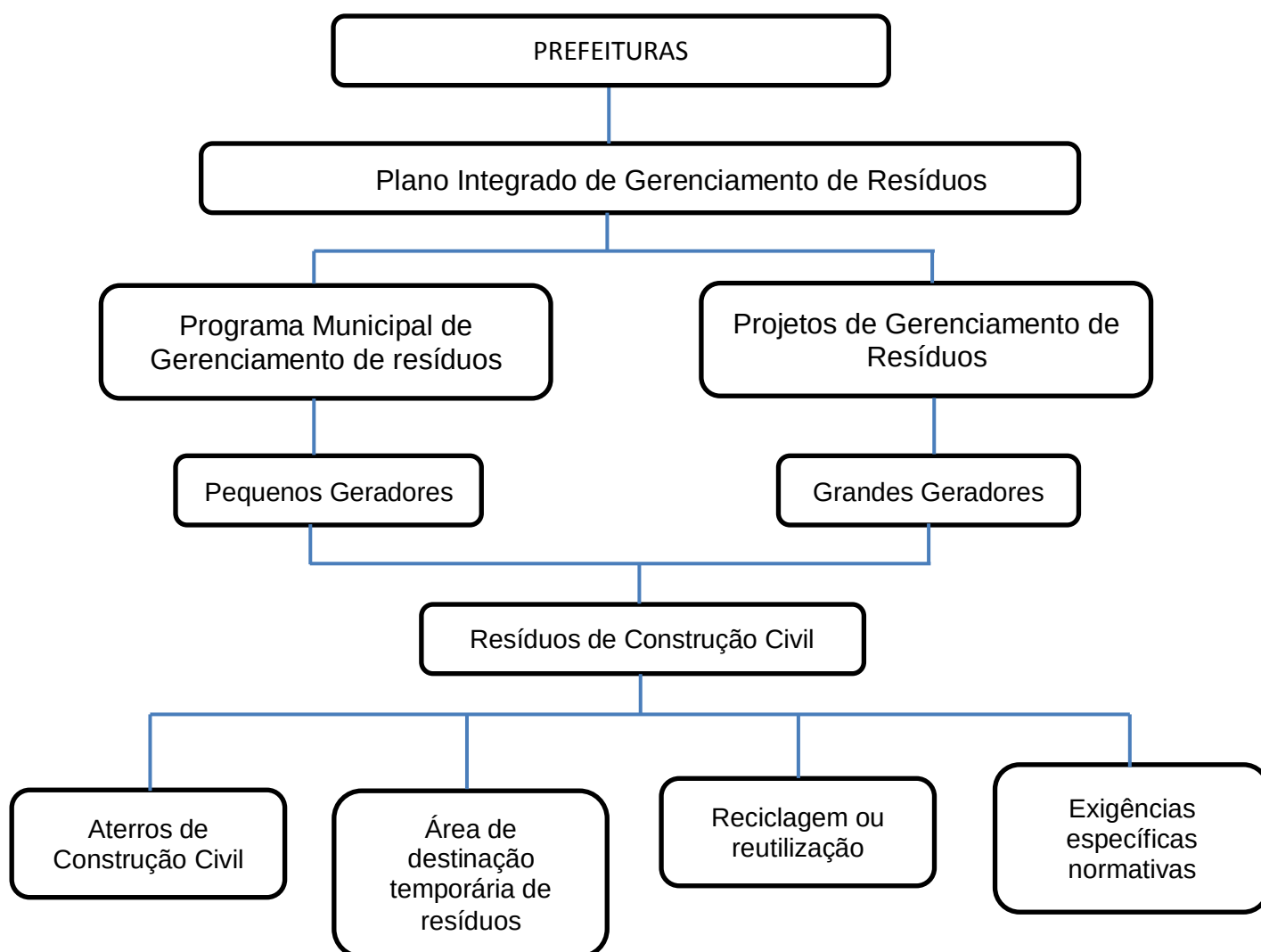


Figura 1.1 Estrutura da gestão de resíduos (CONAMA)

Fonte: Adaptado de Filho (2007)

As problemáticas ambientais envolvendo a grande geração de resíduos da construção civil são notórias, bem como as inúmeras interferências no meio ambiente devido ao acúmulo e destinação inadequada para o resíduo.

Conforme dados obtidos pela URBANA, apenas no ano de 2011 foram coletadas em Natal/RN cerca de 290 toneladas de entulho e resíduos de construção civil pela empresa. Em contrapartida, quando não há uma tecnologia apropriada para o reaproveitamento ou reciclagem do RCD, certamente esse material será

depositado na natureza e poderá ocasionar inúmeros problemas para o meio ambiente.

Mesmo diante desse quadro, percebe-se ainda uma tímida reação, tanto por parte do setor público como do setor privado, no sentido de buscar saídas eficazes através de mecanismos de utilização desse resíduo como agregado que possa ser incorporado ou substituir recursos naturais em linhas de produção, ou até mesmo no seu retorno para as fontes geradoras, como insumo.

Surge então a necessidade de consolidar novos modelos de desenvolvimento, buscando sustentabilidade através de alternativas de utilização dos recursos existentes, orientadas por uma racionalidade ambiental, visando à preservação dos recursos naturais, bem como a correta destinação dos resíduos da construção civil. (BERTOL et al, 2013).

Para Moreira (2010), a reciclagem pode parecer a melhor maneira encontrada para reduzir o impacto ambiental causado pelos resíduos de construção, mas é preferível reduzir ao máximo o desperdício, diminuindo assim a demanda de consumo dos materiais, e dessa forma reduzindo a necessidade de reciclagem.

Várias iniciativas em relação à deposição e reutilização dos resíduos da construção civil merecem destaque, visto que o RCD apresenta inúmeras potencialidades e possibilidades de aplicação na indústria da construção após o seu beneficiamento.

Diversas pesquisas já foram desenvolvidas viabilizando a utilização de RCD em vários segmentos da construção civil, reutilizando o material na própria obra ou disponibilizando-o para usinas de reciclagem para beneficiamento e desenvolvimento de novos materiais a serem utilizados.

Em Natal-RN, apenas em 2012 empresas privadas implantaram duas usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição. Até então a ausência destas era usada como justificativa pelas construtoras para o fato da não obediência à resolução.

Sendo assim, há uma necessidade atual em se conhecer tecnicamente as características dos agregados reciclados produzidos nas usinas de reciclagem locais, proporcionando conhecimento técnico para a cadeia produtiva da construção civil, assim como agregar conhecimento para propor utilizações posteriores para a produção de novos materiais e reaplicação desses agregados na própria construção civil.

1.1 Relevância

Estudos e técnicas sobre as potencialidades e formas de utilização para o RCD são importantes para disponibilizar alternativas de reciclagem, reutilização e aplicação desse material nos processos construtivos, bem como minimizar alguns problemas ambientais, sociais e econômicos gerados a partir de deposições irregulares de resíduos.

Com a pesquisa poderá, será estabelecida uma alternativa de reciclagem para o RCD, minimizando o acúmulo de resíduos em locais inadequados e redução na extração das jazidas naturais. Logo, haverá ganhos econômicos com a utilização de agregados de menores custos, possibilidade de reutilização do próprio resíduo e redução dos custos de produção.

1.2 Justificativa

A maior parte dos estudos na área limita a utilização em larga escala dos agregados reciclados de RCD em argamassas, em virtude das mudanças provocadas nas suas propriedades e pelos elevados índices de absorção apresentados, dependendo da composição do RCD.

A pesquisa também se justifica no quesito referente à racionalização da construção promovida pelo beneficiamento do RCD. Além de ser uma tecnologia ecologicamente correta com o emprego de agregados reciclados, a reutilização desse resíduo representa uma alternativa sustentável para diversos problemas gerados pelos acúmulos em áreas impróprias.

A escolha da cidade de Natal como área de estudo foi realizada com base em diversos fatores, dentre os quais pode ser citado a implantação de duas usinas de reciclagem para o RCD de obras locais, em 2012. Assim, haverá a possibilidade de comprovar cientificamente a possibilidade de utilização e destinação para o agregado reciclado, assim como promover uma divulgação técnica referente ao assunto para a cadeia produtiva da construção civil local.

1.3 Objetivos da Pesquisa

A pesquisa tem como objetivo principal estudar a possibilidade de substituição, parcial ou total, do agregado natural pelo agregado reciclado na produção de argamassas, a partir da análise das variações obtidas em suas propriedades, nos estado fresco e endurecido.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Caracterizar o agregado reciclado produzido a partir do RCD local em função de suas propriedades químicas, físicas, granulométricas e microscópicas;
- Avaliar o desempenho de argamassas de revestimento produzidas a partir de diferentes teores de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado;
- Analisar a influência gerada em virtude da substituição dos agregados naturais pelo reciclados, nas propriedades da argamassa no estado fresco (consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água) e no estado endurecido (resistência à compressão, densidade de massa, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão, absorção, índice de vazios, massa específica e porosidade).

CAPÍTULO 2

2. Fundamentação Teórica

2.1 Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

A indústria da construção civil representa uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico. Apesar de proporcionar a geração de empregos e a viabilização de moradias, renda e infraestrutura, é responsável por uma elevada geração de resíduos em função das suas atividades, provocando alguns impactos ambientais, sociais e econômicos consideráveis.

Os RCD integram os resíduos sólidos urbanos e representam um problema do ponto de vista ambiental. Esses resíduos são provenientes dos serviços de infraestrutura como redes de serviços públicos (água, esgoto, pluvial, gás, energia, elétrica e telefonia) e da execução de novas construções urbanas, demolições e reformas de construções existentes.

Segundo Karpinski et al (2009), a cadeia produtiva da construção civil é responsável por uma quantidade considerável de RCD depositados em encostas de rios, vias e logradouros públicos, criando locais de deposições irregulares nos municípios. Esses resíduos comprometem a paisagem urbana, invadem pistas, dificultam o tráfego de pedestres e de veículos, como também a drenagem urbana; além de propiciar a atração de resíduos não inertes, com multiplicação de vetores de doenças e degradação de áreas urbanas, o que afeta a qualidade de vida da sociedade como um todo.

De acordo com a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA, 2012), a cadeia produtiva da construção civil consome entre 14% e 50% dos recursos naturais extraídos do planeta. No Brasil, o percentual gerado pela construção civil varia de 51% a 70% da massa de resíduo sólido urbano (RSU).

As políticas ambientais relacionadas ao tema devem focar no adequado manuseio, visando uma possível reutilização ou redução, reciclagem e posterior disposição desses resíduos. A principal ação efetiva em termos legais, para a minimização dos problemas ambientais gerados, se deu com a criação da

Resolução 307 de 2012 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que definiu responsabilidades e deveres, justificando um novo sistema de gestão, o qual exige dos geradores a redução, reutilização e reciclagem, tratamento e disposição adequada para o RCD.

A geração de resíduos a partir de obras de construção, demolição e afins, representa um problema complexo, onde se faz necessário a elaboração de um plano de gestão para o gerenciamento e o monitoramento dessas atividades. Atualmente, diversas cidades já desenvolvem projetos de incentivos para a reciclagem e reutilização desse tipo de resíduo, de modo a minimizar os impactos gerados pelos mesmos, seja visual, ambientais, sociais ou econômicos.

As diretrizes que norteiam o segmento de gerenciamento de resíduos sólidos consistem em reduzir os desperdícios e o volume de resíduos gerados, reutilizando os materiais que não requisitem transformações e reciclando os resíduos, gerando a produção de novos produtos. Sendo assim, faz-se necessário a elaboração de um ciclo onde ocorra o gerenciamento desde a geração do resíduo até a sua destinação final.

2.2 Legislação

Como forma de auxiliar de maneira formal as responsabilidades e atribuições pertinentes a gestão de resíduos de construção e demolição, algumas leis e normas técnicas foram elaboradas.

A Resolução 307 do CONAMA (2002) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. Atribui definições específicas para resíduos da construção civil, geradores, agregados, reciclagem, aterro, entre outros itens afins, assim como classifica os resíduos da construção civil por classes e dispõe sobre o destino de cada uma delas.

A resolução definiu as responsabilidades dos geradores, dos transportadores, o gerenciamento interno e externo, a reutilização, a reciclagem, o beneficiamento, aterro de resíduos, áreas de destinação de resíduos, assim como a classificação segundo as características físico-químicas. Esta resolução prevê ainda

o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil como instrumento para implantação da gestão da construção civil, a ser elaborado pelos Municípios e Distrito Federal, o qual deverá incorporar o Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil.” (CONAMA 307, 2002).

Em 2004, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), apresentou um conjunto de normas com base nas diretrizes estabelecidas pelas resoluções do CONAMA, com o objetivo de padronizar e reconhecer o uso do RCD, apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Normas da ABNT voltadas das para o RCD

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

Em abril de 2009, foi implantando o Plano Integrado de Gerenciamento de resíduos sólidos da Prefeitura Municipal de Natal que trata da operacionalização e recebimento de entulhos provenientes de podaço, entulho e resíduos de construção (não superiores a 1,0 m³), materiais recicláveis e óleo de cozinha utilizado.

As unidades de recebimento, denominadas eco-pontos, estão localizadas em pontos distintos da cidade e de fácil acesso a população, onde a retirada dos resíduos nestas unidades se dá gratuitamente pela URBANA. A operacionalização

para o RCD inicia-se a partir da chegada ao eco-ponto e as etapas compreendem o acondicionamento, a coleta, o transporte, a reciclagem, o armazenamento, a comercialização e a destinação final dos rejeitos.

O setor de resíduos sólidos no Brasil passa por um momento de transição haja vista que em julho de 2010 foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que teve sua redação inicial elaborada em 1991.

Figueiredo (2012) indica que a PNRS objetiva ordenar as atividades em um setor caracterizado por deficiências na prestação dos serviços de limpeza, coleta, transporte e tratamento dos resíduos no destino final. A partir da nova política, as municipalidades terão quatro anos para adequar e/ou condicionar seus planos de gestão de resíduos ao que determina a política nacional. Dessa forma, os gestores municipais deverão formular planos de gestão para a erradicação dos lixões e acondicionamento final dos resíduos em aterros sanitários ou destiná-los à incineração, desde que haja a recuperação energética por processos de mecanização. As municipalidades devem, ainda, implementar a coleta seletiva como alternativa a coleta dos resíduos, contando com a participação dos catadores de materiais recicláveis.

Em 30 de setembro de 2011 foi aprovada pela Câmara Municipal de Natal/RN, a Lei nº 6.298 que dispõe sobre a Reciclagem de Resíduos Sólidos provenientes da construção civil. A citada Lei institui o Programa de Reciclagem de Entulhos da Construção Civil para o município de Natal, o qual tem como objetivo incentivar o processamento, a comercialização e o reaproveitamento de materiais recicláveis, provenientes do refugo da construção civil e demolições.

A partir disto, a responsabilidade do resíduo gerado pelas atividades da construção civil passou a ser de responsabilidade do gerador do entulho que deverá direcioná-lo para unidades de reciclagem.

2.3 Agregados reciclados

O Art. 3º da resolução 307 do CONAMA (2012) orienta que os resíduos da construção civil deverão ser classificados, para efeito desta Resolução, da seguinte forma:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras; papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;

IV - Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

A NBR 15116 (ABNT, 2004) define o agregado reciclado como: “Material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura”.

O agregado reciclado apresenta características e propriedades variáveis, que vão depender do processo produtivo e de beneficiamento, dos equipamentos utilizados e dos tipos de materiais componentes do resíduo. Karpinsk et al (2009) observa que a composição dos resíduos de construção e demolição (RCD), oriundos de cada uma das atividades que compõem os trabalhos da construção civil, é diferente em cada etapa da obra, mas sempre há um produto que se sobressai, o qual é diferente em cada país, em razão da diversidade de tecnologias construtivas utilizadas.

Já de acordo com Filho (2005) apud Bertol et al (2013), 40% do entulho da construção civil é composto por solos, matéria orgânica e outros, como sacos de cimento, papel, latas de tinta e embalagens no geral. A partir das pesquisas feitas pelo autor em Natal – RN, os outros 60% apresentam a composição apresentada na Figura 2.1.

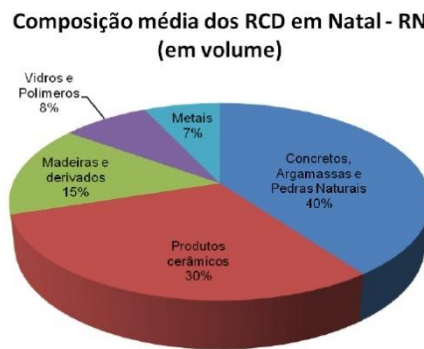


Figura 2.1 Composição do RCD gerado em Natal-RN

Fonte: Silva Filho (2005) apud Bert et al (2013).

As etapas de produção dos agregados reciclados consistem basicamente em uma etapa inicial para separação e triagem do resíduo que chega à usina de reciclagem e em seguida ocorre a etapa de britagem, que não difere muito dos processos que envolvem os agregados naturais.

2.3.1 Separação e Triagem

Com a chegada do caminhão na unidade de recebimento, procede-se com uma inspeção visual e o armazenamento dos resíduos. Na maioria dos casos, o resíduo não é separado no polo gerador, sendo assim, essa etapa é realizada na usina de reciclagem. Em função da grande variabilidade de materiais presentes nos resíduos, é realizada uma triagem de modo a deixá-lo o mais homogêneo possível. Sendo assim teremos a separação dos materiais em resíduo cinza (oriundos de concreto, agregados e argamassas), resíduo vermelho (composto por resíduos de alvenaria, tijolos e materiais cerâmicos), resíduo misto e os resíduos que não são destinados ao processo de britagem.

O entulho se apresenta na forma sólida, com características físicas variáveis, que dependem do seu processo gerador, podendo apresentar-se tanto em dimensões e geometrias já conhecidas dos materiais de construção (como a da areia e a da brita), como em formatos e dimensões irregulares: pedaços de madeira, argamassas, concretos, plástico, metais e outros materiais.

As figuras 2.2 e 2.3 apresentam imagens do resíduo cinza e do resíduo vermelho, respectivamente, obtidas na Usina RCC/RN.



Figura 2.2 Resíduo Cinza



Figura 2.3 Resíduo Vermelho

Logo após a separação, direcionam-se os materiais recicláveis para as unidades de britagem e peneiramento, para a definição dos diâmetros do agregado em diferentes granulometrias.

2.3.2 Produção dos agregados reciclados

Os principais equipamentos envolvidos no processo produtivo dos agregados reciclados são apresentados por Correa et al (2010).

- **Transportador de correia:** é composto por partes padronizadas. Possui uma estrutura simples, além de ser de fácil manutenção, podendo ser adaptado a plantas de britagem móveis ou fixas. De acordo com os materiais a serem transportados, o transportador de correias pode ser instalado horizontalmente ou inclinado. É o transportador que liga os distintos equipamentos (as peneiras e os britadores), e sua escolha depende do diâmetro máximo e da produção horária.
- **Separador magnético:** Usado para a retirada de materiais metálicos dos resíduos a serem britados.
- **Alimentador Vibratório:** O alimentador vibratório é um equipamento de alimentação linear, com baixa vibração, com ação confiável, longa vida útil. Em linhas de produção de pedra ou areia, o alimentador vibratório pode enviar materiais ao britador de forma uniforme e contínua. Ao mesmo tempo em que peneira superficialmente, separa os materiais. Através dessa vibração, os materiais caem no funil e avançam até a peneira, onde os materiais menores caem e evitam a posterior britagem.
- **Britador de Mandíbulas:** Usado para geração do material reciclado conforme diâmetro desejado para britar pedra de alta e média dureza. A capacidade de resistência à pressão é inferior a 200 Mpa, o que o torna adequado para britagem primária.
- **Moinho de Martelo:** Na máquina de moagem de martelo o motor faz o rotor girar em alta velocidade através de correia. No rotor há vários marteletes. Quando o material atinge a área de trabalho dos marteletes, os martelos rotatórios os tritura em alta velocidade de rotação, e os produtos que são britados no tamanho requerido, podem ser descarregados pela saída e se tornam os produtos finais.

Os produtos de tamanho grande retornam à área de britagem pelos marteletes para serem triturados até que atinjam o tamanho desejado.

- **Peneiras Vibratórias:** São dispostas em “decks” para a separação do material segundo sua granulometria. São utilizados para a gradação e o peneiramento de materiais em setores como minerais, pedreiras, materiais de construção, conservação de água, transporte, indústria química, fusão, etc.

Após a etapa de produção, temos a distribuição dos agregados em montantes com diferentes granulometrias e disponíveis para outras destinações e diversas possibilidades de incremento em novos materiais e aplicações construtivas.

Os materiais que após a triagem, não são direcionados para a produção de agregados, são separados por tipo de material, para posterior revenda. Alguns deles estão apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Destinações dos materiais não britados

Material	Destinação
Gesso	cimenteiras
Materiais metálicos	Siderurgicas
Madeira	fornos de industrias
Papelão	cooperativas de reciclagem
Plástico	cooperativas de reciclagem
Matéria orgânica	lixo
Vidro	cooperativas de reciclagem
Isopor	cooperativas de reciclagem

Fonte: Usina de Reciclagem Local

Nas Figuras 2.4 e 2.5, são apresentadas imagens referentes aos britadores utilizados na usina de reciclagem RCC/RN e dos agregados reciclados produzidos.



Figura 2.4 Britadores



Figura 2.5 Agregado reciclado

2.4 Destinações para os agregados reciclados

O agregado reciclado, por apresentar grandes variações na sua composição e distribuição granulométrica, poderá produzir revestimentos com uma variação de desempenho significativa. Contudo, Braga (2010) e Neno (2010) concluíram que, para as porcentagens utilizadas de substituição de areia por agregados reciclados, as argamassas com agregados reciclados apresentaram desempenhos que demonstraram a sua viabilidade como utilizações em argamassas de revestimento.

A utilização de agregados reciclados em concretos já vem sendo realizada em vários países. Kou (2012) destaca a diminuição do módulo de elasticidade e da densidade de concretos produzidos com estes agregados.

Em seus estudos, Oliveira (2011) investigou através de ensaios de laboratório, a viabilidade no aproveitamento dos resíduos gerados em canteiros de obras como material a ser utilizado em obras de solo. A pesquisa fez parte de um estudo sobre as propriedades físicas e mecânicas dos resíduos da construção civil com adição de fibras de polipropileno para fins geotécnicos. Os resultados obtidos foram satisfatórios e os ensaios físicos constataram que os resíduos da construção civil apresentam características granulométricas equivalentes às areias bem graduadas e possuem comportamento não plástico, tal resultado pode ser justificado pela análise microscópica, onde se verificou a presença de material cimentício. O comportamento mecânico do resíduo foi influenciado pela inclusão das fibras de polipropileno e revelou bom desempenho mecânico do material proporcionando assim uma boa utilização na aplicação em obras de geotecnia como estruturas de solo reforçado.

Paula (2010) avaliou o comportamento do RCD beneficiado na produção de blocos com diferentes percentuais de substituições incorporados às misturas, assim como suas características físicas e mecânicas. Como resultado, ele concluiu que o uso de agregados reciclados é viável para a produção de blocos, em função das propriedades mecânicas avaliadas. No entanto, é importante ressaltar que a produção de componentes com 100% de agregados reciclados merece atenção especial, visto que as resistências mecânicas obtidas aos 28 dias na pesquisa ficaram próximas aos limites exigidos por norma. Os resultados foram compatíveis com os valores obtidos por Xiao (2011), que complementa que além de proporcionar uma diminuição nos valores de densidade dos blocos, os agregados reciclados também conferem aos materiais em que são utilizados, aumento nos níveis de absorção, em função da composição dos materiais que o originam, principalmente os cerâmicos.

A pesquisa desenvolvida por Soares (2010) teve o objetivo de estudar a viabilidade técnica da produção de concreto alternativo utilizando RCD e Poliestireno Expandido Reciclado (EPSR), obtido após processo de extrusão e moagem na forma de agregado graúdo ou miúdo. No desenvolvimento das experiências constatou-se a viabilidade técnica da utilização do EPSR como agregado alternativo, proveniente da reciclagem em processamento tecnológico simples do EPS. Como resultado se chegou a um produto consistente de baixa densidade potencialmente utilizável na composição de concreto leve para várias aplicações na construção civil

como enchimentos de piso e blocos para alvenaria de vedação associado a agregados naturais como a areia, seixos e agregados proveniente de RCD de concreto.

As formas de utilização dos agregados reciclados são as mais diversas e podem ser incrementadas em alguns processos construtivos, porém com algumas ressalvas. Goonan (2012) enfatiza em suas pesquisas, que a utilização destes agregados provou ser rentável, mas seu uso tem limitações, em função da variedade de materiais apresentada em sua composição, da restrição pela ausência de especificações e pelo receio na utilização destes agregados. Barbudo (2011) e Tegger (2012) observaram a necessidade de se levar em consideração a maior absorção adquirida pelos materiais produzidos com agregados reciclados, em função da presença de materiais cerâmicos em sua composição.

2.5 Argamassas

2.5.1 Definição

Como definição para a argamassa tem-se:

Argamassa: mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria. (NBR 13281, 2005, p.2).

2.5.2 Materiais constituintes das argamassas

2.5.2.1 Cimento Portland

O Cimento Portland pode ser definido como um pó fino que apresenta propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes e que sofre um processo de endurecimento sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais. (ABCP, 2002).

O cimento é obtido a partir da moagem do clínquer que é um material de natureza granulosa, constituído principalmente por silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas. As matérias-primas utilizadas na fabricação do clínquer são o calcário e a argila. Esses materiais são finamente pulverizados e misturados em proporções adequadas. Em seguida, são levados ao forno produtor do cimento, à temperatura de sua fusão incipiente (em torno de 1450°). Submetidos a esta temperatura, estes materiais sofrem uma transformação química, que resulta na formação do clínquer (clinkerização). Após a queima o clínquer é resfriado, recebe adição de gesso moído, resultando no cimento Portland. (NETO, 2012).

A adição de algumas matérias primas ao clínquer confere ao cimento algumas propriedades específicas e definem diferentes tipos de cimento. As principais adições utilizadas são a escória de alto forno, os materiais pozzolânicos e os materiais carbonáticos.

As escórias de alto forno e as cinzas volantes, quando entram na composição do cimento, contribuem para a preservação do meio ambiente, pelo aproveitamento desses resíduos poluidores e por preservar as jazidas de calcário, além de representar uma economia de energia na produção do cimento.

No mercado, encontram-se disponíveis vários tipos de cimento Portland, apresentando características e propriedades diversas, diferenciados em função de sua composição. Os principais tipos são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Composição e classificação do cimento Portland

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Classe de Resistência	Componentes (% em massa)				
			Clinker + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material Pozolânico	Material Carbonático	Normas
Comum	CPI	25 – 32 - 40	100	0	0	0	NBR 5732:1991
	CPI-S	25 – 32 - 40	99 - 95	1-5	1-5	1-5	NBR 5732:1991
Composto	CPII - E	25 – 32 - 40	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578 : 1991
	CPII - Z	25 – 32 - 40	94 - 76	-	6-14	0-10	NBR 11578 : 1991
	CPII - F	25 – 32 - 40	94 - 90	-	-	6-10	NBR 11578 :1991
Alto-Forno	CPIII	-	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735:1991
Pozolânico	CPIV	-	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736:1999
Alta Resistencia Inicial	CPV-ARI	-	100-95	-	-	0-5	NBR 5733:1991
Branco Estrutural	CPB	25	100-75			0-25	NBR 12989:1993
	CPB	32	100-75			0-25	NBR 12989:1993
	CPB	40	100-75			0-25	NBR 12989:1993
Branco não-estrutural	CPB	-	74-50			26-50	NBR 12989:1993

Fonte: Tabela adaptada das Normas citadas e do Boletim Técnico BT 106 da ABCP, 2002.

2.5.2.2 Cal

Cal é o nome genérico dado ao aglomerante obtido pela calcinação de rochas calcárias, constituídas basicamente pelo carbonato de cálcio (calcário). As rochas calcárias naturais contêm além de carbonato de cálcio (CaCO_3), o carbonato de magnésio (MgCO_3) e outras impurezas. As cales quanto à origem mineral, são classificadas conforme o teor de carbonato de magnésio. Os principais tipos de cales são: cal aérea (cal virgem ou cal hidratada) e cal hidráulica. (NETO, 2012).

A cal hidratada é definida como:

Pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. (NBR 7175, 2003, p.2).

A cal hidratada é o aglomerante aéreo resultante da hidratação da cal virgem, sendo essa hidratação feita em usina, seguindo um processo industrial. Na construção civil, a cal é utilizada sob a forma hidratada no preparo de argamassas de assentamento e revestimento, apresentando na forma de um pó fino e seco.

A partir da sua composição química, física e o seu grau de pureza, a cal hidratada pode ser classificada, a partir da NBR 7175 (ABNT, 2003) em:

- **CH-I:** Quando constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 5%.
- **CH-II:** Quando constituída essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio, e óxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 5%, sem limites para os teores de óxidos não hidratados.
- **CH-III:** Quando constituída essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 13%.

A utilização da cal em argamassas proporciona algumas características importantes. Algumas dela são apresentadas por Guimarães (2009):

- No estado fresco: A cal hidratada tem grande capacidade para reter água em torno de suas partículas, conferindo a argamassa maior plasticidade e trabalhabilidade, além de permitir melhor controle da perda de água para o substrato onde foi aplicada, melhorando sua aderência final.
- No estado endurecido, a presença de cal na argamassa contribui para redução da absorção de água, aumenta a compacidade com o tempo e, por ser um produto alcalino, impede a oxidação da ferrugem. Além disso, age como um agente bactericida e fungicida.

Por ser um produto alcalino evita que se formem manchas e apodrecimento precoce dos revestimentos; proporciona economia de tinta, pois permite acabamento mais liso e de cor clara; é compatível com qualquer tipo de tinta e outros acabamentos, como fórmica, lambris, papéis de parede, se respeitado o tempo mínimo de cura de 28 dias. É importante ressaltar ainda que as argamassas à base de cal hidratada têm baixo módulo de elasticidade, ou seja, absorvem melhor as pequenas movimentações das construções e evitam, portanto, trincas, fissuras e até o descolamento (ou queda) dos revestimentos. (ABCP, 2009).

A utilização de cales hidratadas que não seguiram corretamente os processos de hidratação orientado por norma, provoca, depois de meses ou até anos, o aparecimento de problemas típicos de falta de poder aglomerante: esfarelamento, manchas, trincas, fissuras e desprendimento das camadas de revestimento.

2.5.2.3 Agregado Miúdo

O agregado miúdo é definido como:

Uma areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,8 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm. (NBR 7211, 2009, p.3).

A granulometria e a forma dos agregados exerce função preponderante, nas propriedades das argamassas. Neto (2012) indica que a forma dos grãos do agregado influencia sob os seguintes aspectos:

- Quanto à trabalhabilidade: agregados de forma lamelar produzem massas menos trabalháveis que agregados de formato regular. Essa influência é mais acentuada nos agregados miúdos;
- Quanto à resistência mecânica e ao desgaste: argamassas com agregados de forma lamelar apresentam maior resistência à tração e ao desgaste (abrasão), devido a maior aderência da pasta aos grãos de forma lamelar.

2.5.2.4 Aditivo

O uso de aditivos em argamassas está sendo cada vez mais corrente para melhorias em algumas propriedades, seja no estado fresco ou no estado endurecido.

O aditivo pode ser definido como um material adicionado em pequenas quantidades a determinados materiais, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições.

Os principais tipos de aditivos, segundo Yazigi (2009) são:

- Plastificante: são produtos constituídos por moléculas polares que são adsorvidas pelas partículas de cimento, ficando expostas as extremidades com cargas elétricas iguais e provocando consequentemente a repulsão dessas partículas. Sua principal utilização é para aumentar a trabalhabilidade das argamassas, exigindo menos água para conservar a consistência. Os plastificantes são usados em teores de no máximo 0,5% da massa de cimento.
- Retardador de Pega: é o aditivo que por ação catalítica provoca o endurecimento mais rápido de argamassas e concretos, tendo geralmente efeito de redução do tempo de início de pega. São usados em teores de 2% a 5% da massa de cimento.

- Superplastificante: aditivo que atua como os plastificantes, mas de um modo muito mais intenso e geralmente durante um período de tempo limitado. A variação do teor de aditivo empregado varia entre 1% e 3%.
- Incorporador de ar: aditivo com moléculas polares semelhantes aos plastificantes, que se localizam na superfície ar-água, formando pequenas bolhas de ar que se repelem e, portanto, se mantêm no meio do líquido. O efeito é que se forma uma grande quantidade de pequenas bolhas de ar que, no estado fresco, melhora a trabalhabilidade, pois funcionam como se fossem partículas arredondadas de um agregado muito fino.
- Impermeabilizante: É aditivo que reage com o cálcio do cimento, e o composto resultante repele a água. É utilizado em teores que podem variar de 1% ou 4%, dependendo do fabricante.

2.5.3 Classificação das Argamassas

Existem diversas formas de classificação das argamassas. Recena (2012) apresenta a seguinte classificação:

2.5.3.1 Classificação quanto à forma de endurecimento e resistência a umidade

- Argamassas Hidráulicas: São argamassas produzidas a partir de aglomerantes hidráulicos, onde seu endurecimento é obtido através de reações químicas de hidratação dos compostos básicos do aglomerante hidráulico, devendo necessariamente apresentar estabilidade frente à água após seu endurecimento, endurecendo mesmo debaixo d'água e adquirindo ganhos de resistência ao longo do tempo pela continuidade das reações de hidratação.
- Argamassas Aéreas: As argamassas aéreas são obtidas pelo emprego de aglomerantes que depois de endurecidos não resistem bem a umidade. Necessitam de água para a formação da pasta e para disponibilizar, na forma

quimicamente adequada, os compostos básicos do aglomerante às reação que determinarão seu endurecimento, que poderão ocorrer por reação direta com compostos presentes no ar, como a cal hidratada, ou por reidratação como ocorre com o gesso.

2.5.3.2 Classificação quanto à natureza do aglomerante

- Argamassas minerais: Representam o grupo de argamassas produzidas a partir de aglomerantes minerais, obtidos a partir de minerais naturais ou industrializados.
- Argamassas de Cimento Portland: São as argamassas produzidas a partir da mistura do Cimento Portland e agregado miúdo, onde dependendo do traço utilizado e da relação a/c, podem apresentar elevadas resistências mecânicas.
- Argamassas mistas de cimento e cal: Com a popularização do cimento Portland, este passou a ser misturado as argamassas de cal para a produção de um material intermediário entre as argamassas de cimento e cal, sendo obtido um material com características intermediárias.
- Argamassas de Cal: Argamassa obtida através da mistura de cal e agregado miúdo. Apresentam normalmente baixa resistência mecânica e endurecimento lento.
- Argamassas de Gesso: São as argamassas que utilizam o gesso como aglomerante. O gesso por ser um aglomerante aéreo, apresenta baixa resistência a água. Apresentam aspecto agradável, grande durabilidade e estabilidade de volume.

2.5.3.3 Classificação quanto à utilização

- Argamassas de Assentamento: São argamassas empregadas no assentamento de elementos de alvenarias. Apresentam as funções de distribuir uniformemente as cargas atuantes, absorver da melhor maneira possível as deformações a que uma alvenaria está sujeita, impermeabilizar e contribuir para a impermeabilização das paredes, além de unir solidariamente os elementos da alvenaria, na formação de um todo compacto.

- Argamassas de revestimento: são empregadas no revestimento de alvenarias em paredes, em muros ou em estruturas de concreto armado. Deverão apresentar adequada resistência de aderência ao substrato além de contribuir de forma importante para a impermeabilidade e, em menor escala para o isolamento termoacústico emprestando um bom aspecto ao elemento revestido e assumindo importância quanto ao fator estético das edificações.
- Argamassas de fixação: são argamassas utilizadas na fixação de elementos cerâmicos de revestimento. Atualmente, essas argamassas foram substituídas pelas argamassas colantes, que funcionam em camadas de pequena espessura atuando efetivamente como colas.
- Argamassas de regularização: são argamassas empregadas na regularização de parâmetros verticais ou horizontais.
- Argamassas de recuperação e proteção: são as argamassas utilizadas para reconstituir peças e restaurar camadas de cobrimento sobre as armaduras. Essas argamassas apresentam características especiais, como baixa permeabilidade e grande aderência ao substrato, já que serão responsáveis pela durabilidade das peças recuperadas através da proteção a ser exercida sobre a armadura.

2.5.4 Argamassas de revestimento

De acordo com Cincotto et al (2007), quando empregadas como revestimento às argamassas podem simplesmente exercer a função de cobrir as irregularidades da parede e ser parte constituinte do acabamento estético da edificação, como pode ainda, contribuir para as exigências de segurança e habitabilidade. Diante disso, as argamassas devem apresentar as seguintes características:

- Estabilidade mecânica e dimensional (resistência a tração, compressão, impacto e abrasão) e resistência ao fogo;
- Contribuir para a estanqueidade da parede, constituindo-se em uma barreira a penetração de água;
- Contribuir para o conforto hidrotérmico e acústico do ambiente;

- Deve ser aplicada verificando-se a contribuição da base para o desempenho do conjunto;
- Deve possuir compatibilidade entre seus materiais constituintes e os materiais da base na qual será aplicada.

As camadas de revestimento, segundo Baia (2008), apresentados na Figura 2.6, são:

- **Chapisco:** é uma argamassa preparatória que proporciona condições de fixação para outros elementos. É aplicada com a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção de água em superfícies lisas, favorecendo substratos com pouca absorção, e reduzindo a absorção em substratos muito porosos, o que melhora a aderência dos revestimentos (BAIA, 2008);
- **Emboço:** é uma argamassa de revestimento utilizado para cobrir e regularizar a superfície base, propiciando uma superfície plana que permita receber outra camada de acabamento final, como reboco, cerâmica ou revestimento decorativo final, no caso de aplicação de revestimento em camada única (BAIA, 2008).
- **Reboco:** o reboco é uma argamassa de revestimento utilizada para cobrir o emboço de forma a permitir o uso das pinturas. Possui na sua composição agregados de menor granulometria do que o emboço, apresentando, assim, melhor acabamento superficial;
- **Camada única:** revestimento de um único tipo de argamassa aplicado à base sobre o qual é aplicada uma camada decorativa.

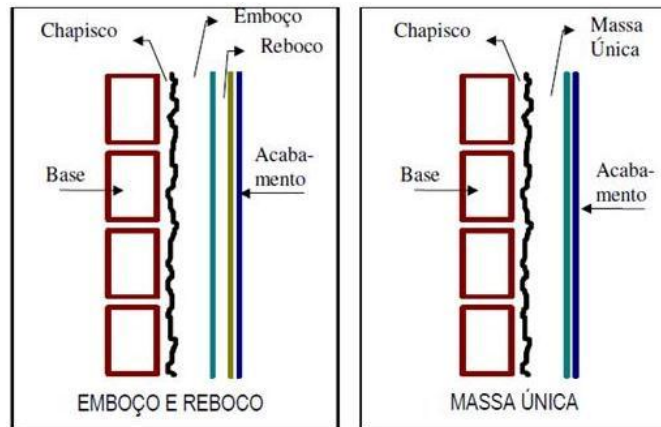


Figura 2.6 Camadas do sistema de revestimento

Fonte: Baia, 2008

2.5.4.1 Classificação das argamassas de revestimento

A NBR 13529 (ABNT, 1995) apresenta uma classificação das argamassas de revestimento em argamassas a base de cal, a base de cimento e a base de cal e cimento. Essa classificação é obtida em função do tipo de aglomerante utilizado.

- **Argamassa de cal:** Este tipo de argamassa é composto por cal, agregado miúdo e água. A pasta de cal preenche os vazios entre os grãos do agregado miúdo, melhorando a plasticidade e a retenção de água. A argamassa de cal recebe usualmente o nome de argamassa intermediária, pois quando se utiliza a cal virgem este tipo de argamassa é utilizado para a maturação da cal, para posteriormente ser misturado o cimento. (PAIXÃO, 2013).
- **Argamassa de cimento:** a argamassa de cimento é constituída por cimento e agregado miúdo. Adquire alta resistência mecânica em pouco tempo, porém tem pouca trabalhabilidade e baixa retenção de água. Como argamassa de revestimento é muito utilizado na confecção de chapiscos (MIRANDA, 2009);
- **Argamassa mista de cimento e cal:** argamassas mistas de cimento e cal apresentam comportamentos característicos dos dois aglomerantes. A cal contribui principalmente pela sua característica plastificante, pela sua capacidade de reter água, o que melhora a trabalhabilidade; já o cimento contribui para a maior resistência mecânica do conjunto. (RECENA, 2012).

2.5.5 Propriedades das argamassas no Estado Fresco

Analisando as propriedades das argamassas no estado fresco, observam-se a consistência, a trabalhabilidade, a consistência, a retenção de água, a densidade de massa e o teor de ar incorporado.

2.5.5.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a principal propriedade das argamassas no estado fresco e determina a facilidade como ela pode ser misturada, transportada e aplicada aos diversos substratos, permanecendo em uma condição homogênea. Na prática, a trabalhabilidade está diretamente ligada à tarefa a ser desempenhada e suas características associadas à função a ser desempenhada.

A modificação da trabalhabilidade estará ligada diretamente à utilização de aditivos plastificantes e à quantidade de água empregada na sua preparação. Desde que haja uma quantidade de material fino, preferencialmente aglomerante, suficiente para reter a água adicionada, há garantias de estabilidade de volume e coesão necessária para promover a aderência instantânea sem a ocorrência de segregação de seus constituintes. O excesso de água tornará a argamassa mais fluida, porém menos trabalhável em função da perda de coesão, destaca Recena (2012).

Freitas (2010) observa que em argamassas de revestimento, o conceito de trabalhabilidade também inclui a capacidade de proporcionar uma boa aderência ao substrato e facilidade de acabamento superficial, influenciando deste modo em propriedades no estado endurecido.

2.5.5.2 Consistência

A consistência da argamassa pode ser definida como a resultante das ações de forças internas, como coesão e ângulo de atrito interno e viscosidade, que condicionam a mudança de forma da mistura. Desta forma, o teor de água, a forma e a textura dos grãos dos agregados e sua granulometria afetam a consistência das argamassas (GOMES, 2008 apud MELO, 2012).

Os procedimentos para preparo da argamassa e determinação do índice de consistência são apresentados na NBR 13276 (ABNT, 2005).

2.5.5.3 Retenção de água

A Retenção de água foi definida por Melo (2012) como a propriedade da argamassa de não perder água, seja por evaporação, seja para o substrato onde ela foi assentada. No estado fresco interfere diretamente na consistência e consequentemente na trabalhabilidade das argamassas. No estado endurecido, interfere nas reações de hidratação do cimento, pois se a argamassa apresenta grande capacidade de retenção de água, a perda da água de amassamento é lenta, proporcionando um progressivo ganho de resistência, conforme observa Recena (2012).

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

As argamassas são classificadas a partir da sua retenção de água, conforme apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Classificação das argamassas em função da retenção de água

Classe	Retenção de Água (%)	Método de Ensaio
U1	≤ 78	ABNT NBR 13280:2005
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

2.5.5.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa ou massa específica varia com o teor de ar incorporado e com a massa específica dos materiais constituintes. Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será ao longo do tempo, reduzindo o esforço do operário na aplicação e gerando, conseqüentemente, um aumento de produtividade na operação. (MELO, 2012).

A avaliação do teor de ar incorporado influencia diretamente a trabalhabilidade e também pode impactar nos valores de resistência mecânica, mas em contrapartida pode beneficiar para uma melhor deformabilidade das argamassas. Além disso, o teor de ar incorporado contribui para o impedimento da passagem de água para o interior da argamassa pelo fenômeno da capilaridade, pois as bolhas de ar incorporado podem interromper parte dos poros capilares das argamassas. (FREITAS, 2010)

O procedimento para determinação destas propriedades está apresentado na NBR 13278 (ABNT, 2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

As argamassas são classificadas a partir da sua densidade de massa no estado fresco, conforme apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado fresco

Classe	Densidade de massa no estado fresco (Kg/m ³)	Método de Ensaio
M1	≤ 1400	ABNT NBR 13278:2005
M2	1200 a 1600	
M3	1400 a 1800	
M4	1600 a 2000	
M5	1800 a 2200	
M6	> 2000	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

2.5.6 Propriedade das argamassas no Estado Endurecido

A análise das propriedades das argamassas no estado endurecido se dá através das propriedades apresentadas a seguir.

2.5.6.1 Densidade de Massa

A densidade de massa pode ser definida como sendo a relação entre a massa e o volume aparente da argamassa.

Freitas (2010) observa que o valor da densidade de massa da argamassa é um indicativo da compactidade resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto. Esta propriedade determina indiretamente o volume de vazios incorporados pelos aditivos e a quantidade de água de amassamento perdida por evaporação.

A densidade de massa no estado endurecido é determinada seguindo as orientações apresentadas pela NBR 13280 (ABNT, 2005).

As argamassas são classificadas a partir da sua densidade de massa no estado endurecido, conforme apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado endurecido

Classe	Densidade de massa no estado endurecido (Kg/m ³)	Método de Ensaio
M1	≤ 1200	ABNT NBR 13280:2005
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	
M6	> 1800	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

2.5.6.2 Resistência à compressão e a tração na flexão

A resistência mecânica das argamassas de revestimento representa uma importante propriedade a ser analisada no desempenho de materiais.

Carasek (2010) define esta propriedade como a capacidade apresentada pelos sistemas de suportarem solicitações de compressão, tração e cisalhamento. Assim, o revestimento de argamassa deve apresentar a capacidade de absorver pequenas deformações sem ruptura ou microfissuras, que poderiam comprometer sua aderência, estanqueidade e durabilidade.

Martins e Assunção (2010) observam que a resistência mecânica das argamassas é analisada pela sua capacidade de resistir a esforços mecânicos sem desagregação ou deformações plásticas visíveis e pela sua resistência ao desgaste superficial. Segundo estes mesmos autores, a resistência mecânica depende da natureza e consumo dos ligantes e agregados, sendo que, nas argamassas de cimento, a resistência à tração e à compressão diminui com o aumento da proporção de agregados.

Para a determinação da resistência mecânica dos revestimentos utiliza-se a NBR 13279 (ABNT, 2005), que estabelece o método para determinação da resistência a tração na flexão e da resistência à compressão de argamassas de assentamento e revestimento.

As argamassas destinadas ao assentamento de paredes ou ao revestimento de paredes e tetos devem cumprir com os requisitos estabelecidos em norma. As argamassas são classificadas a partir da sua resistência a compressão e a tração na flexão, conforme apresentado nas Tabelas 2.6 e 2.7.

Tabela 2.6 Classificação das argamassas em função da resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Método de Ensaio
P1	$\leq 2,0$	ABNT NBR 13279:2005
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	$> 8,0$	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Tabela 2.7 Classificação das argamassas em função da resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Método de Ensaio
R1	$\leq 1,5$	ABNT NBR 13279:2005
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	$> 3,5$	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

2.5.6.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade é uma propriedade importante para as argamassas, pois avalia a resistência do material à deformação elástica, ou seja, quanto maior o módulo maior a rigidez do material.

O desempenho de uma argamassa de revestimento está diretamente ligado à capacidade de absorver deformações, que são medidas através do módulo de elasticidade, pois, se a argamassa for impedida de se deformar ou não possuir elasticidade suficiente, surgirá tensões de tração no revestimento, podendo aparecer fissuras. (JOICHEM, 2012).

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido através da NBR 15630 (ABNT, 2009) – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica.

2.5.6.4 Aderência potencial de resistência à tração

A aderência é uma das propriedades mais importantes na análise de desempenho de argamassas. Ela representa a possibilidade de fixação ao substrato a qual foi aderida.

A aderência é significativamente influenciada pelas condições da base, como a porosidade e a absorção de água, a resistência mecânica, a textura superficial e pelas condições de execução do revestimento. A capacidade de aderência da interface argamassa/substrato depende, ainda, da capacidade de retenção de água, da consistência e do teor de ar aprisionado da argamassa. (PAIXÃO, 2013).

A aderência das argamassas pode ser medida através de ensaios de arrancamento, orientados pela NBR 15258:2005 e NBR 13528:2010 e os limites de aderência são previstos na NBR 13749:2013.

As argamassas são classificadas a partir da sua resistência potencial de aderência à tração, conforme apresentado na Tabela 2.9.

Tabela 2.8 Classificação das argamassas em função da resistência potencial de aderência à tração

Classe	Resistência à aderência a tração (MPa)	Método de Ensaio
A1	$\leq 0,20$	ABNT NBR 15258:2005
A2	$\geq 0,20$	
A3	$\geq 0,30$	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

2.6 Produção de argamassas com agregados reciclados

A reciclagem dos resíduos de construção e demolição apresenta-se como uma possibilidade para minimizar os problemas gerados pelos resíduos do ponto de vista econômico, ambiental e social e pode ser observado que a sua aplicação já ocorre há bastante tempo.

De acordo com Pinto (2008), a fração fina do material reciclado obtido na britagem ou moagem do entulho, a depender das suas características, pode ser utilizada nas argamassas, em substituição às adições ou aos agregados convencionais. A granulometria semelhante à da areia permite o seu uso como agregado para argamassa de assentamento e revestimento, as quais têm apresentado desempenho similar ou superior às convencionais, tanto em ensaios de laboratório quanto em aplicações de campo.

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

Em sua pesquisa, Heineck et al (2013) concluíram que o uso de agregados reciclados originou argamassas mais porosas e com índices de vazios superiores às argamassas produzidas com agregado natural. Em contrapartida, o módulo de elasticidade dinâmico se pronunciou menor que a argamassa com agregado natural, o que pode ser uma característica positiva para as argamassas, pois o revestimento fica mais deformável, prevenindo possíveis problemas de fissuração no revestimento. A densidade de massa e massa específica real apresentaram resultados inferiores à argamassa de referência. Quanto à absorção de água por capilaridade, a argamassa com agregado reciclado demonstrou que o uso de

resíduos de concreto reduz a absorção de água no capilar, exigindo um estudo de compatibilidade com as características do substrato.

Hawlitschek et al (2013) avaliaram a influencia das areias recicladas em argamassas e observaram algumas diferenças no desempenho das argamassas causadas pelas diferentes características das areias, principalmente morfologia, porosidade e área superficial. Em função da elevada porosidade da areia reciclada, o consumo de água aumentou em cerca de 20% e 30% em relação às areias naturais e como consequência, o desempenho mecânico das argamassas produzidas com areia reciclada ficou 25% abaixo comparada a argamassa produzida com areia natural. O pesquisador concluiu que de maneira geral, a britagem dos RCD em frações mais finas apresenta um potencial para que possa ser utilizada como alternativa em locais onde a disponibilidade de jazidas de areia natural é escassa ou suas distâncias de transporte são maiores, principalmente considerando-se a substituição parcial em argamassas.

CAPITULO 3

3. Metodologia Experimental

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e o procedimento experimental adotado, com a finalidade de alcançar os objetivos definidos para a pesquisa. O procedimento experimental foi dividido em quatro etapas, conforme apresentado nas Figuras 3.1 e 3.2, respectivamente, elaborado para cumprir os objetivos da pesquisa.

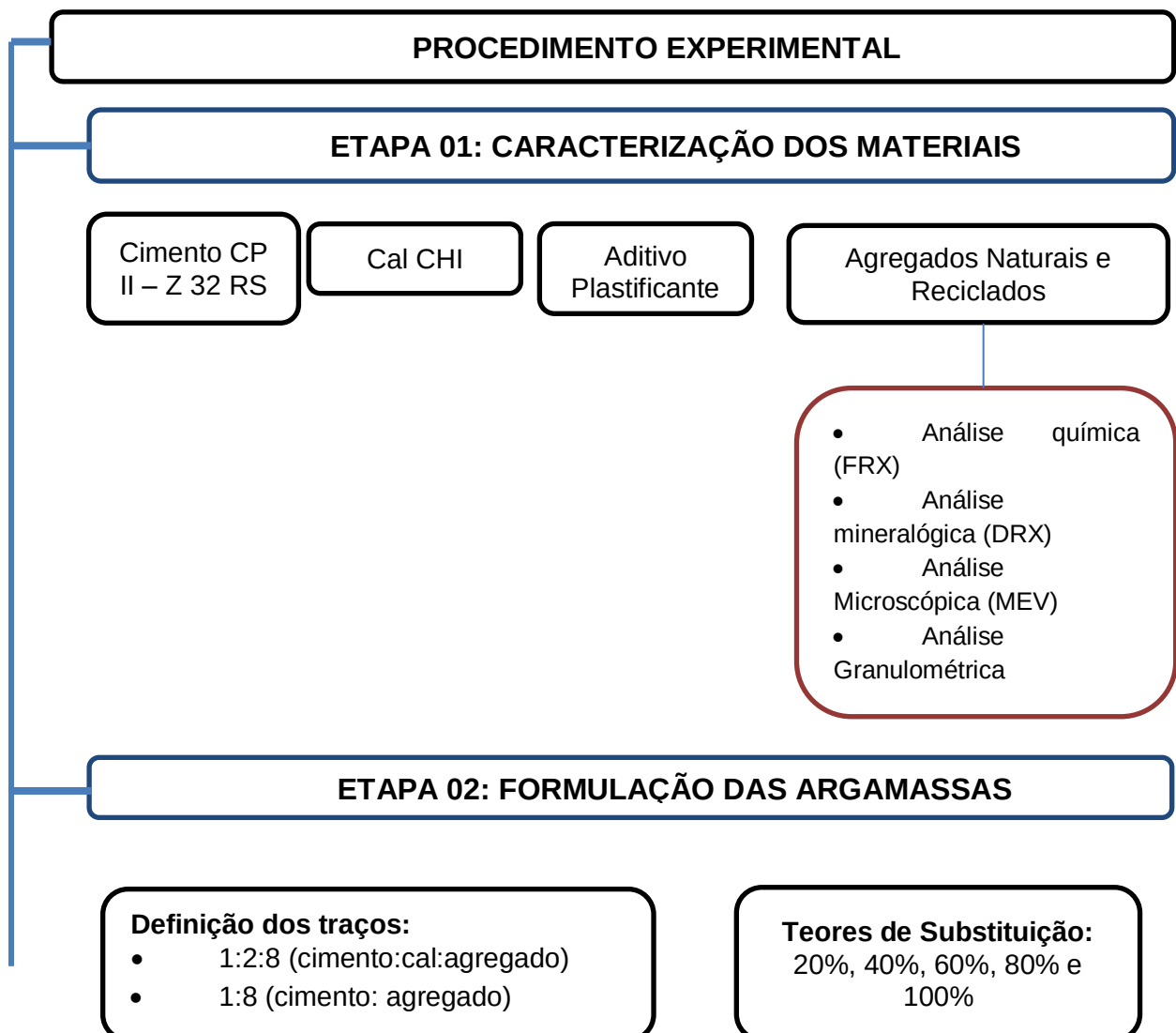


Figura 3.1 Fluxograma das etapas 01 e 02 da metodologia experimental

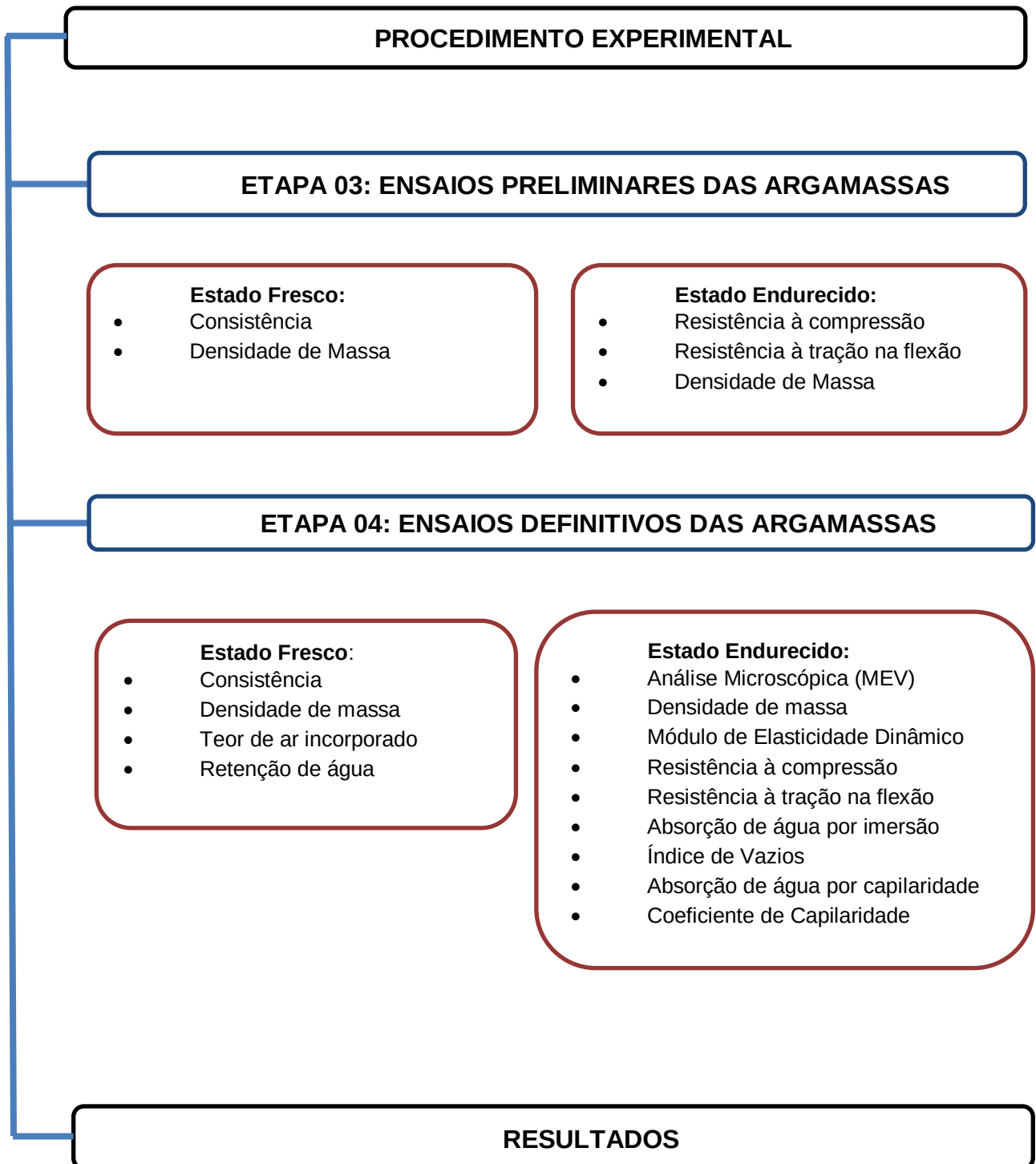


Figura 3.2 Fluxograma das etapas 03 e 04 da metodologia experimental

3.1 Caracterização dos Materiais

Nesta etapa inicial foram realizados os ensaios químicos, físicos, mecânicos e análises microscópicas (MEV) para a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil e as análises físicas, químicas, mineralógicas e microscópicas foram realizadas no Laboratório de Engenharia de Materiais, ambos localizados no Núcleo Tecnológico da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

3.1.1 Materiais

3.1.1.1 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II Z - 32 - RS, da marca Mizu, de um mesmo lote, adquirido no mercado local e comumente utilizado em obras da Grande Natal/RN.

A caracterização Química (Tabela 3.1), Física (Tabela 3.2), e Mecânica (Tabela 3.3) do cimento foram obtidas através dos boletins técnicos fornecidos pelo fabricante.

Tabela 3.1 Caracterização Química do Cimento CP II - Z 32 RS

Ensaio	Unidade	Resultados	Especificação NBR 11578 (ABNT, 1991)
Perda ao Fogo - PF	%	5,66	≤ 6,50
Resíduo insolúvel (RI)	%	11,26	≤ 16,0
Trióxido de Enxofre (SO ₃)	%	2,81	≤ 4,00
Óxido de Cálcio Livre (CaO)	%	2,83	Não se aplica

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Cimentos Mizu (Novembro, 2013).

Tabela 3.2 Caracterização Física do Cimento CP II - Z 32 RS

Ensaio	Unidade	Resultados	Especificação NBR 11578/91
Área Específica (Blaine)	cm ² /g	4130	≥ 2400
Massa específica	g/cm ³	2,99	≤ 6,5
Finura - Retido na peneira de 0,045 (#325)	%	10,89	≤ 16,0
Finura - Retido na peneira de 0,075 (#200)	%	1,40	≤ 12,0
Expansibilidade (quente)	mm	1,60	≤ 5,0
Início de Pega	h	2,18	≥ 1 h
Fim de Pega	h	2,97	≤ 10 h
Consistência Normal	%	30,56	

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Cimentos Mizu (Novembro, 2013).

Tabela 3.3 Caracterização Mecânica do Cimento CP II - Z 32 RS

Ensaio	Unidade	Resultados	Especificação NBR 11578/91
Resistência a compressão 3 dias	MPa	20,02	≥ 10
Resistência a compressão 7 dias	MPa	27,94	≥ 20
Resistência a compressão 28 dias	MPa	35,57	≥ 32

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Cimentos Mizu (Novembro, 2013).

O resultado para determinação da massa unitária foi obtido a partir de ensaios realizados em laboratório, seguindo como orientação a prescrição da NBR NM 45 (ABNT, 2006). O valor determinado foi de $\mu_u = 1,38 \text{ g/cm}^3$.

3.1.1.2 Cal

A cal hidratada utilizada foi a CH - I. Na produção das argamassas, a cal passou pelo processo de maturação, atendendo aos procedimentos orientados pela NBR 13276 (ABNT, 2005).

Os resultados dos ensaios para obtenção das propriedades químicas e físicas foram disponíveis em boletins fornecidos pelo fabricante.

A cal apresenta, de acordo com os boletins técnicos fornecidos pela Carbomil, uma estrutura microcristalina romboédrica, de origem sedimentar marinha e apresenta em sua composição carbonato de cálcio natural cretáceo (Boletim Técnico Carbomil, 2013).

A Composição Química (Tabela 3.4) e Caracterização Física e Granulométrica (Tabela 3.5) estão apresentadas a seguir.

Tabela 3.4 Caracterização Química da Cal CH - I		
Composição Química	Unidade	Resultados
PPC	%	23 - 25
Ca(OH) _{2d}	%	90 - 98,5
MgO	%	3,5
Resíduo insolúvel (em HCL)	%	0,5
SiO ₂	%	0,3
R ₂ O ₃	%	1,5

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Carbomil (Julho, 2013).

Tabela 3.5 Caracterização Física e Granulométrica da Cal CH - I

Características Físicas	Unidade	Resultados
Retenção em #325	%	1,50
Umidade	%	2,00
Densidade Aparente	g/cm ³	0,65
Diâmetro a 50%	µm	19
Diâmetro a 90%	µm	55

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Carbomil (Julho, 2013).

Os resultados obtidos em laboratório foram de 2,29 para massa específica e de 0,51 para massa unitária.

3.1.1.3 Aditivo

Na pesquisa, utilizou-se o aditivo plastificante VEDALIT, da marca VEDACIT, indicado para argamassas de assentamento e revestimento. Para efeitos de dosagem, seguiram-se as recomendações do fabricante.

O aditivo é composto de resinas naturais e apresenta densidade de 1,01 g/cm³. O líquido é de coloração escura e isento de cloretos. O aditivo foi adicionado à água de amassamento durante o processo produtivo das argamassas, conforme recomendação do fabricante.

O uso de aditivo plastificante é justificado pelo elevado nível de absorção apresentado pelos agregados reciclados, em função da sua morfologia e textura. O emprego do aditivo permite compensar a perda de trabalhabilidade, evitando o acréscimo de água na mistura e não interferindo nos níveis de resistência e durabilidade das argamassas.

3.1.1.4 Agregados Miúdos

O agregado natural utilizado na pesquisa apresenta uma granulometria fina e de origem natural, provenientes de leito de rio e disponíveis no mercado local para serem utilizadas em obras de construção civil.

O agregado reciclado foi produzido na Usina de Reciclagem RCC/RN, a partir do resíduo de construção e demolição de obras correntes da Grande Natal/RN.

3.1.2 Análises e ensaios dos agregados naturais e reciclados

3.1.2.1 Análise Química (FRX)

O conhecimento da composição química dos agregados é importante, pois justifica algumas variações ocorridas durante o desenvolvimento da pesquisa, além de interferir no desempenho das argamassas produzidas. Sendo assim foram realizadas as análises químicas para os dois tipos de agregados, de modo a proporcionar alguns comparativos posteriormente.

As análises químicas foram desenvolvidas por fluorescência de raios X, onde foi utilizado o espectrômetro por fluorescência de raios X do tipo EDX – 720, Shimadzu, em uma atmosfera a vácuo e desenvolvido o método semi-quantitativo para a determinação dos elementos presentes nas matérias-primas.

As análises foram desenvolvidas no Laboratório de Difração e Fluorescência de raios X, no Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN.

3.1.2.2 Análise Mineralógica (DRX)

Para identificação das fases presentes nos agregados reciclados, foram realizadas análises mineralógicas por Difração de raios X. As análises foram realizadas em amostras com granulometria inferior a 100 mesh (ABNT n° 100, 0.149 mm) utilizando-se radiação Cu – K α , com tensão acelerada 40 kV e corrente de 30 mA, com varredura de 2 θ de 5° a 80° e velocidade de 5°/min.

O equipamento utilizado foi de marca Shimadzu modelo XRD – 7000, localizado no Laboratório de Difração de raios X da UFRN.

3.1.2.3 Análise Microscópica (MEV)

A análise microscópica foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), de forma a se obter a morfologia dos agregados. Com isso, obtiveram-se características da forma e da textura dos grãos de agregado.

As micrografias foram obtidas em equipamento da marca Hitachi modelo TM-3000, localizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de varredura (MEV) do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN.

3.1.2.4 Análise Granulométrica

A fim de se obter uma padronização granulométrica, os agregados foram peneirados em malha de 2,40 mm, considerando a faixa granulométrica compreendida a partir da malha 1,2 mm. Os agregados foram previamente secos em estufa a 105°C por um intervalo de 24 h. Antes do preparo das argamassas, os agregados foram esfriados ao ar livre. Na figura 3.3 é apresentada uma amostra do agregado reciclado na granulometria obtida na usina de reciclagem e na Figura 3.4, tem-se o agregado reciclado após a padronização.



Figura 3.3 Agregado reciclado com a granulometria obtida na usina de reciclagem



Figura 3.4 Agregado reciclado peneirado

Para a determinação da distribuição granulométrica utilizou-se o procedimento descrito na NBR NM 248 (ABNT, 2003) – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica.

As amostras peneiradas foram secas em estufas a temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ e esfriadas ao ar livre. Em seguida, foram colocadas no conjunto de peneiras cujas malhas são 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm, e 0,075mm, com fundo coletor e tampa, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para cada amostra foram calculadas as porcentagens de material retido e acumulado nas peneiras.

O módulo de finura foi calculado somando-se as porcentagens retidas acumuladas em massa dos agregados e dividindo-se por 100.

Os ensaios de granulometria foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.1.2.5 Massa Específica

Os ensaios para determinação da massa específica dos agregados foram obtidos através do procedimento descrito na NBR NM 52 (ABNT, 2009).

A partir das amostras foram selecionadas 500g para a determinação da massa específica. O ensaio foi realizado com o frasco de CHAPMAN, colocando-se água no frasco até o volume inicial $L_i = 200 \text{ cm}^3$, em seguida foi seco o canal de

entrada até o primeiro balão e, com auxílio de um funil, inclinando-se o frasco, depositou-se o agregado natural de areia de forma gradual.

Após a mistura da água e do agregado agitou-se o frasco na posição inclinada, apoiando-se o canal de entrada com uma das mãos e girando-se com outra mão em sua base para que houvesse homogeneização e o agregado se acomodasse na parte mais baixa do recipiente, durante 5 minutos. Em seguida colocou-se para descansar, a fim de que as bolhas de ar fossem liberadas para superfície, fazendo-se duas vezes para mensurar a média da leitura final do volume.

Para o cálculo da massa específica, utilizou-se a equação 3.1:

$$\mu_E = \frac{M_s}{L_f - L_i}$$

Equação 3.1

Onde:

- μ_E é a massa específica do agregado (Kg/L);
- M_s é a massa do material seco (500g);
- L_i é a leitura inicial do frasco (200 cm³);
- L_f é a leitura final do frasco.

Os ensaios para determinação da massa específica foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.1.2.6 Massa Unitária

Para está análise, as amostras dos agregados foram colocadas em compartimento cúbico com massa e volume conhecidos. Em seguida, o material foi despejado lentamente no centro do recipiente a uma altura constante de 12 cm da superfície dos grãos já colocados até o seu preenchimento total. Ao término, o recipiente com o material foi pesado e a massa unitária calculada com base na equação 3.2:

$$\mu_u = \frac{Mt - Mr}{Vr}$$

Equação 3.2

Onde:

- Mt corresponde a massa total composta pela massa do recipiente com a amostra;
- Mr corresponde a massa do recipiente;
- Vr corresponde ao volume do recipiente.

Os ensaios para determinação da massa unitária foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.2 Formulação das argamassas e definição dos Teores de Substituição

3.2.1 Definição dos traços

Para a produção das argamassas foram definidos dois traços, com base em formulações utilizadas no mercado da construção civil em obras correntes. A escolha também se deu a partir da necessidade de se utilizar uma formulação com um baixo consumo de cimento, mas que atendesse as propriedades exigidas para argamassas de revestimento.

O primeiro traço, designado como Traço Preliminar 1 (TP₁), foi definido nas proporções de 1:2:8 (cimento:cal hidratada:agregado) em volume. A formulação pode ser visualizada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Formulação do traço TP1 (1:2:8)

Traço (em volume)	Traço com AR (em volume)	Composição do Traço	Teor de Substituição	Nomenclatura
	1:2:8	cimento : cal : AN	Referência	TP1-0
	1:2:(6,4:1,6)		20%	TP1-20
	1:2:(4,8:3,2)		40%	TP1-40
1:2:8	1:2:(3,2:4,8)	cimento : cal : AN : AR	60%	TP1-60
	1:2:(1,6:6,4)		80%	TP1-80
	1:2:(0:8)		100%	TP1-100

O outro traço adotado, designado como Traço Preliminar 2 (TP₂), foi de 1:8 (cimento:agregado), em volume. As informações para esta formulação estão apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Formulação do traço TP2 (1:8)

Traço (em volume)	Traço com AR (em volume)	Aditivo Plastificante (%)	Composição do Traço	Teor de Substituição	Nomenclatura
	1:8	-	cimento : AN : aditivo	Referência	TP2-0
	1:(6,4:1,6)	0,10		20%	TP2-20
	1:(4,8:3,2)	0,20		40%	TP2-40
1:8	1:(3,2:4,8)	0,30	cimento : AN : AR	60%	TP2-60
	1:(1,6:6,4)	0,20		80%	TP2-80
	1:(0:8)	0,10		100%	TP2-100

As porcentagens de substituição foram definidas em 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, em volume, do agregado natural pelo agregado reciclado, proporcionando um acompanhamento mais preciso das mudanças nas características das argamassas produzidas conforme aumento gradativo em função da substituição dos agregados.

3.2.2 Preparo das Argamassas

Para a determinação da quantidade de água necessária para a produção das argamassas, seguiu-se o procedimento prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2005) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.

Sendo assim, o valor do índice de consistência adotado para as duas formulações (TP1 e TP2) foi fixado em 260 ± 5 mm, conforme orientações da referida norma.

Para a formulação TP1, utilizou-se o procedimento descrito para argamassa a base de cimento e cal hidratada. Neste caso, preparou-se com antecedência de 16h a 24h, uma argamassa de cal hidratada. Sendo assim, inseriu-se no misturador mecânico, em velocidade baixa, a areia, a cal e a água em quantidades definidas a partir do traço escolhido, por um intervalo de 4 min. Após o intervalo de maturação, acrescentou-se à mistura, a água perdida por evaporação e juntamente com o cimento, realizou-se uma nova homogeneização por 4 min em velocidade baixa.

Para a formulação TP2, utilizou-se o procedimento descrito no item referente a Argamassa a base de cimento (com adições e aditivos). Sendo assim, inicialmente misturaram-se manualmente os materiais secos até obter-se certa homogeneidade e em seguida acrescentou-se a água, misturando em velocidade baixa por 90s. Após a mistura, a argamassa ficou em repouso durante 15 min e após esse intervalo, misturou-se manualmente por 30s. Para esta formulação, a quantidade de água foi mantida constante e o controle para obtenção da consistência desejada foi realizado através de um aditivo plastificante.

3.3 Ensaios Preliminares

Nesta etapa, foram realizados alguns ensaios preliminares para análise das principais alterações obtidas com a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. O resultado desta análise inicial proporcionou um conhecimento prévio das principais alterações geradas e a partir delas, definiu-se a formulação para a realização dos ensaios definitivos.

Foram desenvolvidos ensaios nas argamassas no estado fresco e no estado endurecido, conforme descritos nos itens 3.3.1 e 3.3.2.

3.3.1 Argamassas no Estado Fresco

3.3.1.1 Consistência

Para a determinação do índice de consistência, realizou-se o procedimento descrito na NBR 13276 (ABNT, 2005) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.

Conforme orienta a norma, o ensaio consiste no preenchimento de um molde tronco-cônico colocado sobre uma mesa para a determinação do índice de consistência. Realiza-se o preenchimento do molde em três camadas sucessivas, com alturas aproximadamente iguais, aplicando-se a cada uma delas, 15, 10 e 5 golpes, respectivamente, com a utilização de um soquete metálico. Realiza-se o rasamento da argamassa com uma régua metálica. Em seguida, aciona-se a manivela da mesa de modo que a mesma suba e caia 30 vezes durante 30s de maneira uniforme. Após a última queda da mesa, efetua-se a medição do espalhamento do molde tronco-cônico da argamassa com paquímetro. O índice de consistência da argamassa corresponde à média de três medidas de diâmetros, expressa em milímetros e arredondada ao número inteiro mais próximo.

Os ensaios de índice de consistência foram realizados no laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.3.1.2 Densidade de Massa no Estado Fresco

O procedimento experimental para o desenvolvimento deste ensaio está descrito na NBR 13278:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

O ensaio consiste em adicionar a argamassa em um recipiente cilíndrico, devidamente calibrado e de volume conhecido, formando três camadas de alturas

aproximadas. Em seguida, cada camada deve ser adensada com 20 golpes de espátula ao longo do perímetro da argamassa, inserida e retirada verticalmente. Após o preenchimento do recipiente, deve-se efetuar três quedas dele, com altura aproximadamente de 3 cm, rasá-lo e pesá-lo com a argamassa.

Para o cálculo da densidade de massa da argamassa em kg/m³, utiliza-se a equação 3.3:

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \times 1000$$

Equação 3.3

Onde:

- m_c é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em gramas;
- m_v é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;
- V_r é o volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos.

Os ensaios para determinação da densidade de massa no estado fresco foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.3.2 Propriedades das argamassas no Estado Endurecido

3.3.2.1 Resistência à compressão e a tração na flexão

A resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas foi determinada em corpos-de-prova nas idades de 7 e 28 dias, conforme procedimento descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005).

Para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão, os corpos-de-prova foram posicionados nos dispositivos de apoio do equipamento. Optou-se por efetuar marcações do eixo central dos corpos-de-prova para correto posicionamento. Em seguida, aplicou-se uma carga de (50±10)N/s até a ruptura do corpo-de-prova. A resistência à tração é calculada segundo a equação 3.4:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{40^3}$$

Equação 3.4

Onde:

- R_f é a resistência à tração na flexão, em MPa;
- F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;
- L é a distancia entre os suportes, em mm.

Para a realização do ensaio de resistência a compressão, utilizou-se as metades dos corpos-de-prova ensaiados no ensaio de resistência a tração na flexão, conforme a referida norma. Aplica-se uma carga de (500 ± 50) N/s até a ruptura do corpo-de-prova. A resistência à compressão é calculada a partir da equação 3.5:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Equação 3.5

Onde:

- R_c é a resistência à compressão em MPa;
- F_c é a carga máxima aplicada em N.

Os ensaios de resistência a tração na flexão e à compressão foram realizados em equipamento da marca Shimadzu, modelo Autograph AG-X, localizado no Laboratório de Metais e Ensaos Mecânicos, vinculado ao Departamento de Engenharia de Materiais, localizado no Núcleo Tecnológico da UFRN. As Figuras 3.5 e 3.6 ilustram a execução dos ensaios.



Figura 3.5 Equipamento Shimadzu - modelo Autograph AG-X



Figura 3.6 Corpo-de-prova em ensaio de tração na flexão

3.3.2.2 Densidade de Massa no Estado Endurecido

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido foi realizado aos 28 dias, seguindo a prescrição da NBR 13280 (ABNT, 2005). Os corpos-de-prova foram moldados de acordo com o estabelecido pela NBR 13279 (ABNT, 2005).

O ensaio consiste em determinar, com o auxílio de paquímetro, a altura, a largura e o comprimento de cada corpo-de-prova em duas posições, em centímetros. Determina-se a massa, em gramas, do corpo-de-prova. Em seguida, de posse das medidas do corpo-de-prova, calcula-se o volume de cada.

A densidade de massa é calculada através da equação 3.6:

$$\rho_{\text{máx}} = \frac{m}{v} \times 1000 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Equação 3.6

Onde:

- m é a massa do corpo-de-prova;
- v é o volume do corpo-de-prova calculado.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção, localizado no Núcleo Tecnológico da UFRN.

3.4 Ensaios Definitivos

Após a realização dos ensaios preliminares e os ajustes obtidos com base nos resultados iniciais, foram desenvolvidos os ensaios definitivos para a pesquisa, utilizando-se a formulação TP2, que corresponde ao traço 1:8 (cimento:agregado) em volume.

Os ensaios definitivos foram realizados de forma a complementar os ensaios preliminares e promover uma análise mais abrangente acerca das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

3.4.1 Estado Fresco

3.4.1.1 Consistência

Foram mantidos os resultados dos ensaios preliminares correspondente aos índices de consistência obtidos. Sendo assim, a quantidade de água para cada argamassa foi mantida constante, de acordo com os resultados obtidos no ensaio.

3.4.1.2 Densidade de Massa e teor de ar incorporado

Foram realizados novos ensaios para determinação da densidade de massa no estado fresco, com o objetivo de elevar o número de amostras e resultados.

Para determinação do teor de ar incorporado, utilizou-se o procedimento previsto na NBR 13278 (ABNT, 2005) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

O cálculo do teor de ar incorporado, expresso em porcentagem, foi determinado a partir da equação 3.7:

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right)$$

Equação 3.7

Onde:

- d é o valor da densidade de massa da argamassa, em g/cm³;
- d_t é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, em g/cm³, sem vazios.

Para argamassas dosadas e preparadas em obra, a densidade de massa teórica deve ser calculada pela equação 3.8:

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}}$$

Equação 3.8

Onde:

- m_i é a massa seca de cada componente da argamassa, mais a massa de água;
- γ_i é a massa específica de cada componente da argamassa.

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFRN.

3.4.1.3 Retenção de Água

Para a realização deste ensaio, seguiram-se os procedimentos previstos na NBR 13277 (ABNT, 2005), onde se utiliza o funil de Buchner modificado com bomba de vácuo. O ensaio consiste na medição da massa de água retida na argamassa após a sucção.

- Inicialmente a argamassa foi preparada em conformidade com a NBR 13.276 (ABNT, 2005).
- Em seguida, montou-se o funil de Buchner com o prato, papel filtro umedecido e aplicou-se uma sucção de 51 mm de coluna de mercúrio por 90s, fechando-a em seguida. Pesou-se o conjunto funil/papel-filtro úmido e registrou-se sua massa (m_v);

- Preencheu-se o prato com argamassa e realizou-se um adensamento com 37 golpes de soquete, sendo 16 golpes aplicados junto a borda e 21 golpes em pontos centrais distintos da argamassa;
- Com o auxílio de uma régua metálica, retirou-se o excesso de argamassa até a obtenção de uma superfície plana.
- Pesa-se o conjunto com a argamassa rasada e registra sua massa (m_a);
- Aplica-se uma sucção de 51 mm de mercúrio durante 15 min, fechando-a em seguida;
- Remove-se o prato do funil, pesa-se o conjunto e registra sua massa (m_s);
- Para determinação da quantidade de água retida, foi utilizada a equação 3.9:

$$R_a = \frac{m_a - m_s}{AF(m_a - m_s)} \times 100$$

Equação 3.9

Onde:

- R_a = retenção de água (%);
- m_a = massa do conjunto com argamassa (g);
- m_s = massa do conjunto com argamassa após sucção (g);
- m_v = massa do conjunto vazio com papel filtro úmido (g);
- $AF = \left[\frac{m_w}{(m + m_w)} \right]$ = fator água/argamassa fresca;
- m_w = massa total de água adicionada a mistura (g);
- m = soma das massas dos componentes anidros (g).

O procedimento experimental descrito foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.4.2 Propriedades das argamassas no Estado Endurecido

3.4.2.1 Análise Microscópica

A análise microscópica permite uma investigação mais precisa relacionada a microestrutura interna dos materiais. Para a análise microscópica das argamassas, as amostras foram extraídas de corpos-de-prova de traço 1:8 (cimento:agregado), moldados para quatro formulações: 0%, 40%, 60% e 100%. A análise microscópica foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com microscópio de marca HITACHI, modelo TM -3000.

O procedimento foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV), vinculado ao Departamento de Engenharia de Materiais, localizado no Núcleo Tecnológico da UFRN.

3.4.2.2 Resistência à compressão e resistência a tração na flexão

Os resultados de resistência à compressão e a tração na flexão também foram mantidos a partir dos ensaios realizados na etapa preliminar. Mesmo assim, optou-se por realizar novos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão, expandindo os resultados obtidos e comparando-os com os valores obtidos na etapa preliminar.

3.4.2.3 Densidade de Massa

Para a análise da densidade de massa no estado endurecido, optou-se por manter os resultados obtidos nos ensaios preliminares.

3.4.2.4 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O procedimento experimental para a determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico das argamassas produzidas seguiu a prescrição da NBR 15.630 (ABNT, 2005) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e

tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.

O ensaio foi realizado utilizando-se 03 corpos-de-prova, para cada teor de substituição, aos 28 dias. O módulo de elasticidade foi determinado utilizando-se o método dinâmico através da equação 3.10:

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

Equação 3.10

Onde:

- E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, expresso em MPa;
- v é a velocidade de propagação da onda ultrassônica, expressa em milímetros por micros segundos (mm/μs);
- ρ é a densidade de massa aparente do corpo-de-prova, expressa em quilogramas por metro cúbico (Kg/m³);
- μ é o coeficiente de Poisson, adotado nesta equação em 0,2.

Para a realização do procedimento foi utilizado o equipamento modelo Tico da marca Proceq, com transdutores de 54 KHz e forma direta de leitura. O equipamento é de propriedade do Laboratório de Cimentos da UFRN.

3.4.2.5 Absorção de água, Índice de Vazios e Massa Específica

Para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas foi utilizado o procedimento descrito na NBR 9778 (ABNT, 2009) – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. O procedimento consiste na análise da variação de massa partindo do estado seco da argamassa até a saturação.

Para o ensaio, foram moldados 3 corpos-de-prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm) para cada um dos traços estudados conforme recomendação da NBR 13279 (ABNT, 2005), curados ao ar em ambiente de laboratório por 28 dias.

Para a determinação dos índices, foram realizadas as seguintes etapas:

- Secagem das amostras em estufa na temperatura de (105 ± 5) °C por um período de 72h. Registro da massa da amostra (m_s);

- Imersão das amostras em água por 72h. Após esse período as amostras foram colocadas num recipiente com água, levado progressivamente a ebulição. A ebulição foi mantida por 5h e o volume de água foi mantido constante. Em seguida, deixou-se esfriar naturalmente até a temperatura ambiente $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$. Após esse processo, registrou-se a massa com auxílio de uma balança hidrostática amostra (m_i).
- Em seguida, as amostras foram retiradas da água, enxugadas e registradas as suas respectivas massas (m_{sat}).

Para a determinação da absorção de água dos corpos-de-prova ensaiados foi utilizada a equação 3.11:

$$A = \left(\frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \right) \times 100$$

Equação 3.11

Onde:

m_{sat} = massa das amostras saturada após fervura e pesada em balança convencional;

m_s = massa da amostra seca.

Na determinação do índice de vazios das argamassas e da massa específica da amostra seca foram utilizadas, respectivamente, a Equação 3.12 e 3.13.

$$I_v = \left(\frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \right) \times 100$$

Equação 3.12

$$\rho_s = \left(\frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \right)$$

Equação 3.13

Onde:

I_v = índice de vazios;

m_i = massa da amostra saturada após fervura, pesada em balança hidrostática;

ρ_s = massa específica da amostra seca.

O procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.4.2.6 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada em corpos-de-prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm) aos 28 dias, seguindo-se o método prescrito pela NBR 15259 (ABNT, 2005). Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada traço estudado.

Para a determinação da absorção de água por capilaridade foram seguidas as seguintes etapas:

- Os corpos-de-prova foram pesados;
- Em seguida foram posicionados com a face para baixo em recipiente com nível de água constante de 5 ± 1 mm, acima do nível de contato entre a face do corpo-de-prova e a água e com superfície;
- Os corpos-de-prova imersos foram pesados após 10 e 90 minutos de imersão, e antes de cada pesagem removeu-se o excesso de água com pano úmido, conforme orientação da norma.

O procedimento foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.4.2.7 Aderência

A análise da resistência potencial de aderência à tração será realizada em função dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade, retenção de água, resistência à compressão e resistência à tração na compressão, para todas os teores de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados.

CAPITULO 4

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa, compreendendo a caracterização dos materiais, a discussão e a tomada de decisão obtida em função dos ensaios preliminares, assim como os resultados e a análise obtida nos ensaios definitivos.

4.1 Caracterização dos Agregados

A caracterização realizada para os agregados foi mais abrangente por representar o material substituído nas argamassas produzidas e analisadas na pesquisa.

4.1.1 Análise Química dos agregados naturais e reciclados

A análise química realizada nos agregados naturais apresentada na Figura 4.1, revela um teor de 65,37% de Dióxido de Silício (SiO_2), caracterizando o agregado natural com uma quantidade de quartzo bem elevada, em relação aos demais óxidos.

Em porcentagens menores tem-se o Óxido de Zircônia (ZrO_2) com 7,04%, Óxido de Cálcio (CaO) com 6,34%, Óxido de Alumínio (Al_2O_3) com 5,10%, Óxido de Titânio (TiO_2) com 4,80% e Óxido de Potássio (K_2O) com 4,60%.

A análise química também apresentou Óxido de Estrôncio (SrO), Dióxido de Enxofre (SO_3), Óxido de Ferro (Fe_2O_3), Óxido de Manganês (MnO), Óxido de Ítrio (Y_2O_3), e Óxido de Rubídio (Rb_2O) com teores abaixo de 3%.

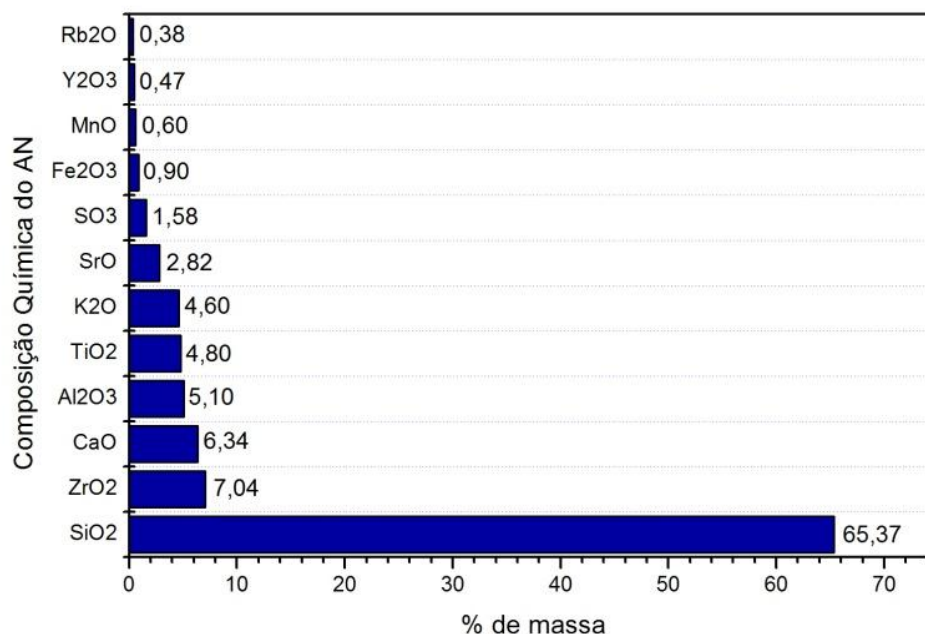


Figura 4.1 Análise química (FRX) dos agregados naturais

Nos agregados reciclados, conforme apresentado na Figura 4.2, a análise química revela teores de 44,47% de Dióxido de Silício (SiO₂) 19,97% de Óxido de Alumínio (Al₂O₃) e 15,92% de Óxido de Zircônia como sendo os óxidos mais representativos da amostra analisada.

A análise química também apresentou teores de Óxido de Estrôncio (SrO) com 5,30% e Óxido de Titânio (TiO) com 3,99%. Em porcentagens com teores abaixo de 1% cada, tem-se Óxido de Bário (BaO), Óxido de Manganês (MnO), Óxido de Rubídio (Rb₂O), Óxido de Zinco (ZnO) e Óxido de Cobre (CuO).

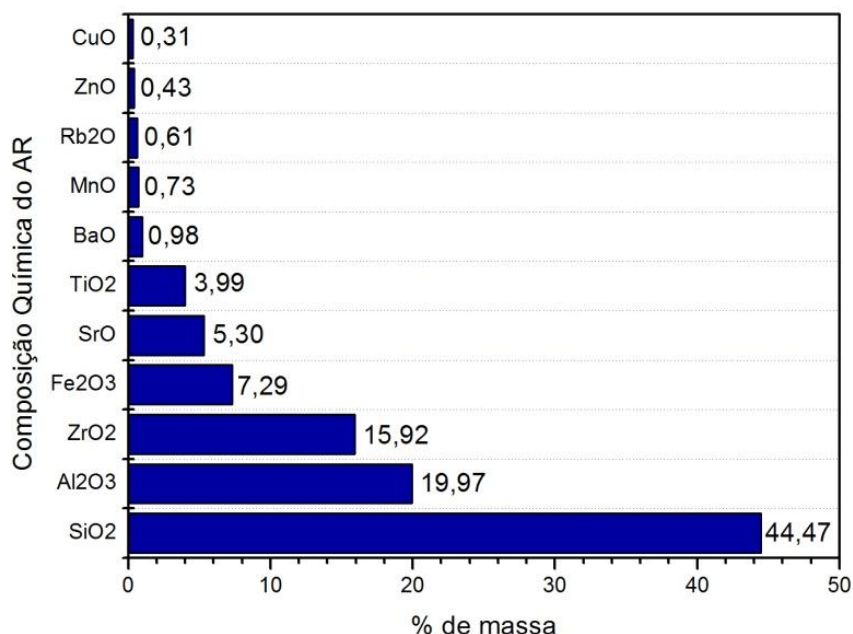


Figura 4.2 Análise química (FRX) dos agregados reciclados

Observa-se nas duas amostras analisadas, que ambas apresentam alguns óxidos em comum, porém em teores distintos. Os agregados reciclados apresentam uma variedade maior de componentes químicos, em função dos materiais que os originaram, diferente dos agregados naturais.

Os resultados apresentados estão próximos dos valores obtidos por Lasso (2011), que concluiu que o alto índice de Si encontrado nos agregados reciclados, valores entre 60% e 80%, é compatível com o histórico desse resíduo devido a presença de materiais como areia e brita em obras de construção civil. A presença dos óxidos de alumínio e de ferro se justifica como sendo provenientes de materiais argilosos presentes nos materiais cerâmicos e foram encontrados em teores de 15% e 20%, respectivamente.

Sendo assim, a análise química realizada na pesquisa vem a apresentar valores compatíveis com os obtidos em pesquisas semelhantes, o que demonstra a partir da composição química obtida, que são oriundos de materiais como concretos, argamassas e produtos cerâmicos.

4.1.2 Análise Mineralógica dos agregados reciclados

A Figura 4.3 apresenta o resultado para a análise mineralógica realizada por Difração de raios X para o agregado reciclado, indicando a predominância de fases cristalinas em função dos picos agudos representados.

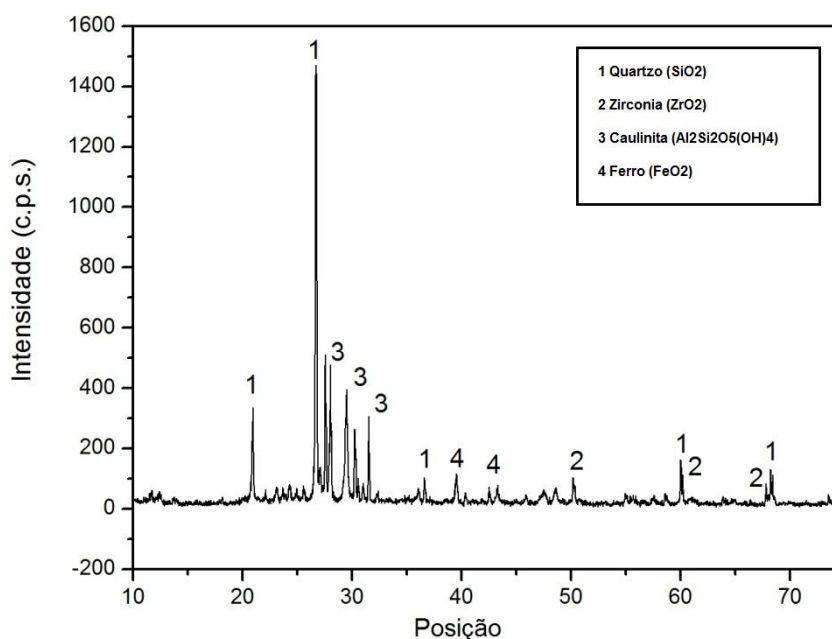


Figura 4.3 Análise mineralógica (DRX) dos agregados reciclados

A partir dos resultados observa-se a predominância de quartzo, provavelmente como sendo proveniente de materiais de construção que utiliza areia na sua composição, como concretos e argamassas. A zircônia, caulinita e o óxido de ferro são devidos aos materiais cerâmicos presentes no RCD.

Os resultados obtidos no DRX são compatíveis aos resultados apresentados na análise química por FRX, descrito no item 4.1.1. O difratograma evidencia que o RCD apresenta fases químicas diferenciadas.

4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

4.1.3.1 Agregados Naturais

Na Figura 4.4, visualizam-se os agregados naturais para uma ampliação de 100x. A micrografia apresenta a morfologia dos agregados, onde se observa o formato dos grãos. Estes não apresentam uma forma definida, onde alguns apresentam formas arredondadas e outras, formas angulosas, que são características típicas dos agregados naturais.

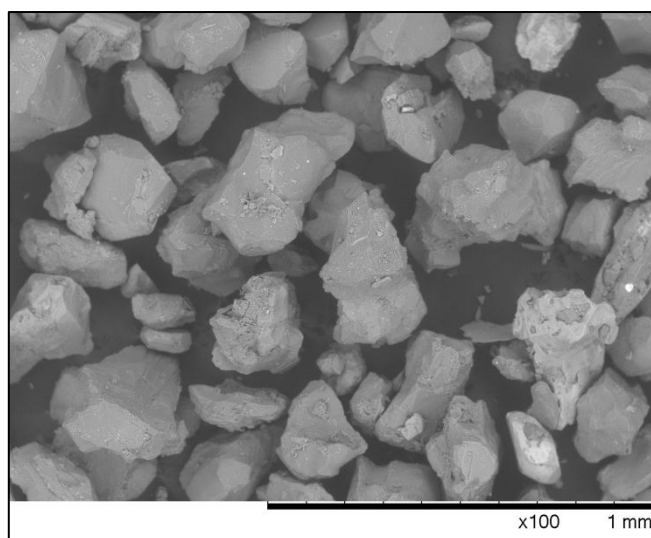


Figura 4.4 MEV do agregado natural (100x)

A demanda de água esta diretamente relacionada com a forma das partículas. No caso dos agregados naturais apresentados na Figura 4.4, a forma esférica das partículas proporciona um efeito de rolamento favorecendo a trabalhabilidade.

Na Figura 4.5, observa-se uma micrografia para uma ampliação de 600x. Nesta, pode-se observar de maneira mais clara a textura do grão e visualizar a superfície predominantemente lisa. Em relação à forma do grão, conclui-se que não há forma geometria definida, mas há a predominância de uma superfície angular com algumas arestas.

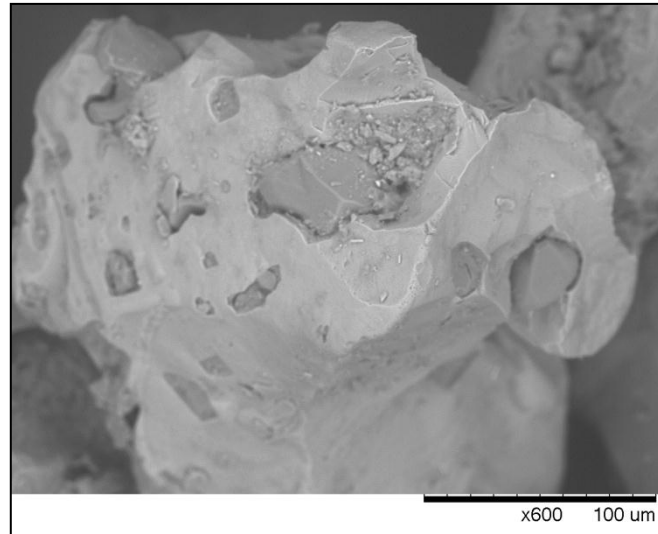


Figura 4.5 MEV do agregado natural (600x)

4.1.3.2 Agregados Reciclados

A micrografia visualizada na Figura 4.6 apresenta de forma mais abrangente a morfologia dos grãos de agregado reciclado. Observa-se certa variação no formato e na textura dos grãos. Apresentando uma superfície mais arredondada, porém com uma textura superficial bastante rugosa e porosa, comparada aos agregados naturais.

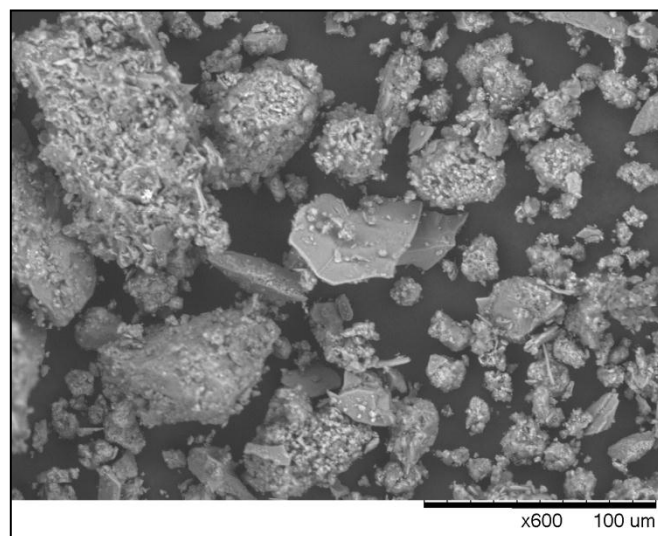


Figura 4.6 MEV do agregado reciclado (600x)

Na Figura 4.7 pode-se observar com maior precisão a textura do grão do agregado reciclado. A elevada rugosidade apresentada pelo grão poderá elevar consideravelmente os índices de absorção dos materiais produzidos, porém auxilia de forma positiva na aderência entre pasta e agregado. As argamassas produzidas com estes agregados tendem a ser menos trabalháveis.

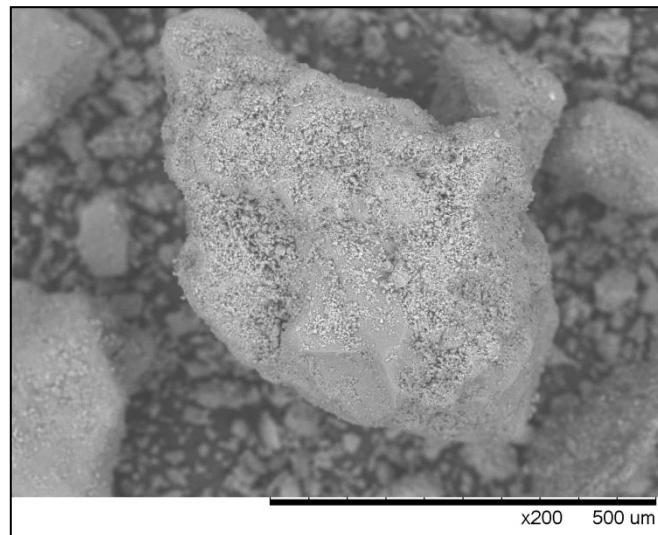


Figura 4.7 MEV do agregado reciclado (500x)

As micrografias obtidas revelam que as partículas de agregado reciclado são ainda mais esféricas. Os poros presentes na sua microestrutura e sua elevada área superficial favorecem os índices de absorção e diminuem a trabalhabilidade das argamassas produzidas. Logo, o consumo de água é maior quando utilizam-se os agregados reciclados.

A superfície predominantemente lisa conferida aos agregados naturais demanda um menor consumo de água, favorecendo à trabalhabilidade, porém diminuindo a aderência em relação à pasta de cimento. Nos agregados reciclados, a superfície altamente rugosa, compromete a trabalhabilidade em função da absorção da água da mistura, porém favorece a aderência do sistema pasta-agregado.

Os micrografias obtidas por MEV, confirma as conclusões obtidas por Werle et al. (2010) em suas pesquisas. O pesquisador observou que os agregados reciclados possuem forma mais angulosa, textura superficial rugosa e grande potencial de absorção de água; assim os materiais produzidos com esses agregados

apresentam um comportamento diferenciado em relação aos materiais produzidos com agregados convencionais.

Cardoso (2010) observa que quando se utilizam agregados reciclados, é necessário observar as diferenças quanto à forma, à textura e à resistência mecânica das partículas, havendo necessidade de adequação específica desses agregados para sua aplicação. Segundo o pesquisador, isto corresponde a uma das dificuldades da utilização em argamassas de revestimento em função do formato inadequado das partículas, dificultando principalmente a trabalhabilidade e consistência.

Na caracterização realizada por Descarrega (2011), os agregados reciclados apresentaram uma textura totalmente irregular, áspera e porosa, proporcionando elevados índices de absorção e favorecendo a aderência na produção de argamassas.

4.1.4 Análise Granulométrica

A composição granulométrica obtida através do ensaio de granulometria prescrito pela NBR 248 (ABNT, 2003) apresentaram os resultados para os agregados naturais e reciclados, expostos na Tabela 4.1 e 4.2, respectivamente.

Além da composição granulométrica, são apresentados os resultados para módulo de finura, massa específica e unitária, dimensão máxima característica e zona de graduação, a fim de se obter elementos comparativos para o desenvolvimento da pesquisa.

Tabela 4.1 Granulometria e características físicas dos agregados naturais

Abertura da peneira ABNT (mm)	% Retida em massa	% Retida em massa acumulada	Procedimento (NBR)
4,8	-	-	
2,4	-	-	
1,2	0,59	0,59	
0,6	29,15	29,75	NM 248:2003
0,3	57,37	87,12	
0,15	12,77	99,89	
<0,15	0,11	100,00	
Total	100,00	-	
Módulo de Finura	2,17 (Zona Ótima)		NM 248:2003
Massa Específica (Kg/m³)	2,63		NM 52:2009
Massa Unitária (Kg/m³)	1,51		NM 45:2006
Dimensão Máxima característica (mm)	1,2		NM 248:2003
Zona de Graduação	Areia Fina		NBR 7211:2009

Tabela 4.2 Granulometria e características físicas dos agregados reciclados

Abertura da peneira ABNT (mm)	% Retida em massa	% Retida em massa acumulada	Procedimento (NBR)
4,8	-	-	NM 248:2003
2,4	-	-	
1,2	0,03	0,03	
0,6	14,09	14,12	
0,3	55,68	69,80	
0,15	22,75	92,55	
<0,15	7,45	100,00	
Total	100,00	-	
Módulo de Finura	1,76 (Zona Ótima)		NM 248:2003
Massa Específica (Kg/m³)	2,51		NM 52:2009
Massa Unitária (Kg/m³)	1,23		NM 45:2006
Dimensão Máxima característica (mm)	1,2		NM 248:2003
Zona de Graduação	Areia Fina		NBR 7211:2009

A partir dos resultados obtidos, observa-se que os agregados apresentam uma distribuição granulométrica semelhante, embora os agregados naturais possuam ligeiramente uma maior quantidade de grãos compreendidos na faixa de diâmetros entre 0,6 mm e 0,3 mm, enquanto que os agregados reciclados apresentam uma maior quantidade de grãos na faixa granulométrica de 0,3 mm a 0,075 mm, ou seja, apresentam uma granulometria mais fina que os agregados naturais, como se observa na Figura 4.8.

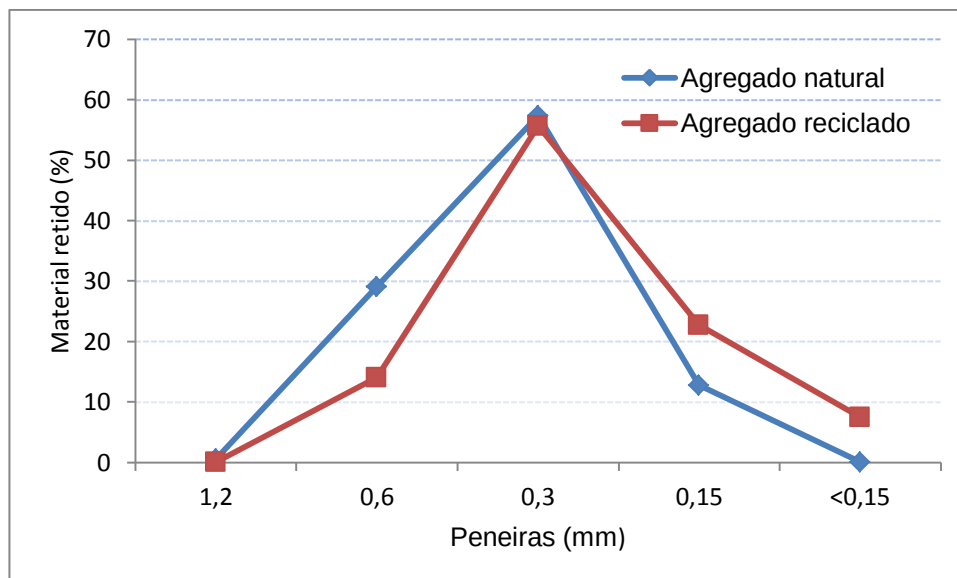


Figura 4.8 Distribuição granulométrica dos agregados naturais e reciclados

O agregado reciclado apresentou uma menor massa específica que o agregado natural. Tal fato se justifica, possivelmente, pela maior quantidade de poros que os agregados reciclados apresentam. Essa maior porosidade também acarreta em uma menor massa unitária, como observado nos comparativos entre os dois agregados.

O módulo de finura apresentou-se menor para o agregado reciclado em relação ao agregado natural, caracterizando-o e ratificando a granulometria dos agregados reciclados como mais fina.

Os resultados obtidos diferem dos valores encontrados por Jochem (2012), onde a sua pesquisa mostrou que os valores de massa unitária e específica foram maiores para os agregados reciclados utilizados, porém a pesquisadora complementa que de acordo com o histórico e a bibliografia pertinente, os valores das massas específicas e unitárias dos agregados reciclados são em média 10% menores que dos agregados naturais.

Os resultados obtidos por Cabral et al (2011) em seus ensaios de caracterização apontam os agregados reciclados com valores maiores de absorção de água e teor de finos < 75µm e menor massa específica e massa unitária que as dos agregados naturais. A distribuição granulométrica, o módulo de finura e a dimensão máxima característica de ambos foram semelhantes.

Os resultados também foram próximos aos obtidos por Guerrero (2012), onde em função dos ensaios de absorção e granulometria, os agregados reciclados

apresentaram valores elevados de absorção e agregados menos densos, comparados aos agregados naturais.

4.2 Ensaios Preliminares

Serão apresentados e discutidos os ensaios realizados na fase preliminar da pesquisa. Os resultados preliminares obtidos proporcionaram informações importantes para o desenvolvimento da pesquisa e serviram de parâmetro para a realização dos ensaios definitivos.

4.2.1 Propriedades das argamassas no Estado Fresco

4.2.1.1 Índice de Consistência

Na Figura 4.9 estão apresentados os valores referentes ao espalhamento obtido nos ensaios de Índice de Consistência. Observa-se que para todas as formulações, o índice de consistência atende o intervalo de 260 ± 5 mm, exigido pela NBR 13276 (ABNT, 2005).

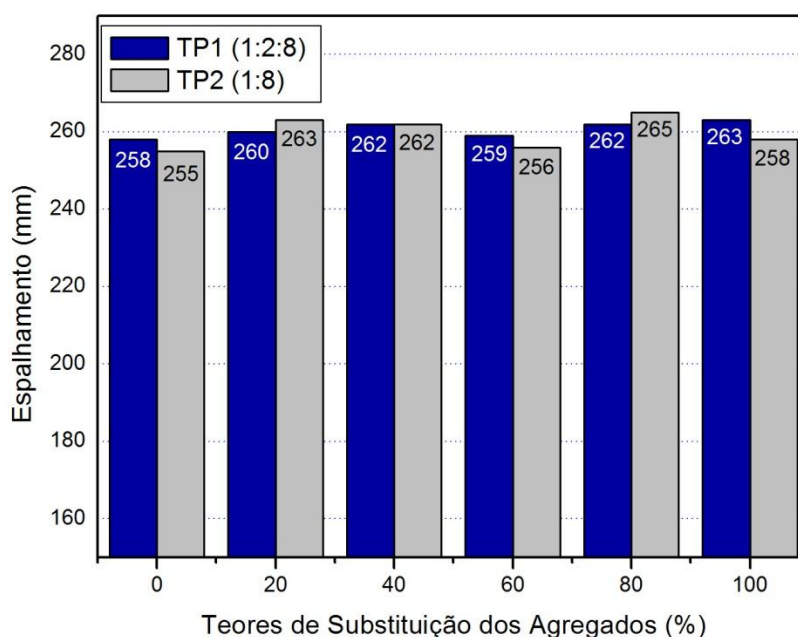


Figura 4.9 Índices de consistência para as formulações TP1 e TP2

Para a formulação TP1, a quantidade de água foi aumentando substancialmente, à medida que os agregados naturais foram sendo substituídos pelos agregados reciclados. Para esta formulação, observou-se uma grande absorção da água de amassamento durante o processo de maturação da cal. Isso se justifica principalmente pela superfície rugosa e porosa dos grãos de agregados reciclados. A princípio, a utilização da mesma quantidade de água obtida para as argamassas de referência, resultou em argamassas secas e de baixa trabalhabilidade. Dessa forma, optou-se por aumentar a quantidade de água para obtenção da consistência desejada.

Para a formulação TP2, a relação a/c foi mantida constante e a consistência desejada foi obtida a partir de um aditivo plastificante. Dessa forma, a quantidade de água de amassamento foi a mesma para todas as formulações. A quantidade de aditivo utilizado atendeu a faixa definida pelo fabricante ($< 0,5\%$ em relação ao cimento).

Na Figura 4.10, é apresentada a relação a/c para todas as formulações estudadas na pesquisa.

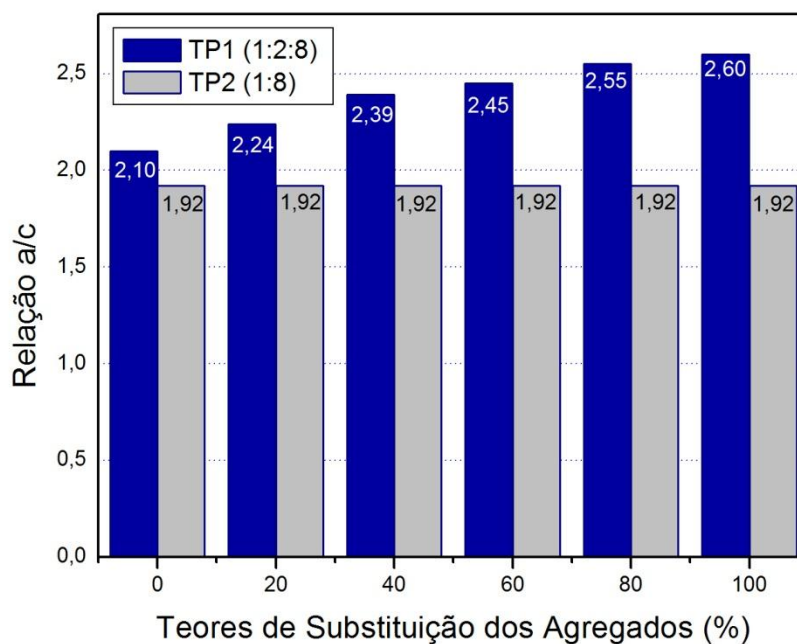


Figura 4.10 Relação a/c para as formulações TP1 e TP2

Junior (2011) analisou a utilização de agregados reciclados em argamassas e utilizou a formulação 1:6 (aglomerante:agregado). Nos resultados obtidos na sua pesquisa, ele observou que a absorção de água dos agregados reciclados interferiu negativamente na consistência e na trabalhabilidade da mistura. Isso ocorreu na primeira substituição de 50% dos agregados. Na argamassa com teor de 100% de agregado reciclado, a mistura tinha aspecto “seco” ou “áspero”, levando ao uso de uma quantidade ainda maior de aditivo plastificante, para se chegar à consistência adequada. As argamassas produzidas com agregados reciclados por Martinez (2013) também apresentaram a necessidade de aumentar o fator a/c para obtenção da consistência adequada.

4.2.1.2 Densidade de massa das argamassas no estado fresco

Nos ensaios realizados para densidade de massa no estado fresco, cujos resultados estão apresentados na Figura 4.11, observa-se certa variação da mesma, a partir da substituição dos agregados.

Na formulação TP1 ocorreu um gradativo aumento da densidade de massa, em virtude principalmente do acréscimo de água utilizado, para atingir a consistência determinada.

Na formulação TP2 houve uma diminuição da densidade de massa, ao passo que foram sendo adicionados os agregados reciclados. Isso se deve principalmente ao fato dos agregados naturais serem mais densos, como pode ser observado na etapa de caracterização dos materiais (item 4.1). Como a quantidade de água foi mantida, esta não interferiu na variação dos resultados de densidade de massa das argamassas produzidas.

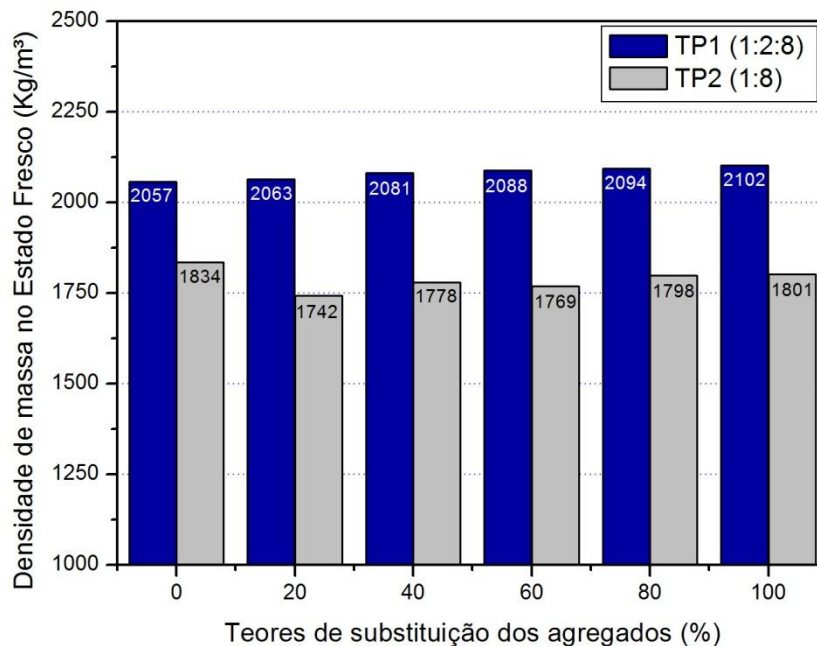


Figura 4.11 Densidade de massa das argamassas no estado fresco para as formulações TP1 e TP2

Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será a longo prazo, reduzindo esforço em sua aplicação e resultando em maior produtividade.

Paixão (2013) analisou o desempenho de argamassas a partir do traço 1:3 (cimento:agregado) e verificou a diminuição da densidade de massa a partir da substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados. Na pesquisa, ela conclui que essa diminuição confere às argamassas uma maior compacidade da mistura agregado/aglomerante.

4.2.2 Propriedades das argamassas no Estado Endurecido

4.2.2.1 Densidade de massa das argamassas no estado endurecido

Os resultados referentes à densidade de massa no estado endurecido estão apresentados na Figura 4.12 e observam-se algumas variações a partir da substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados.

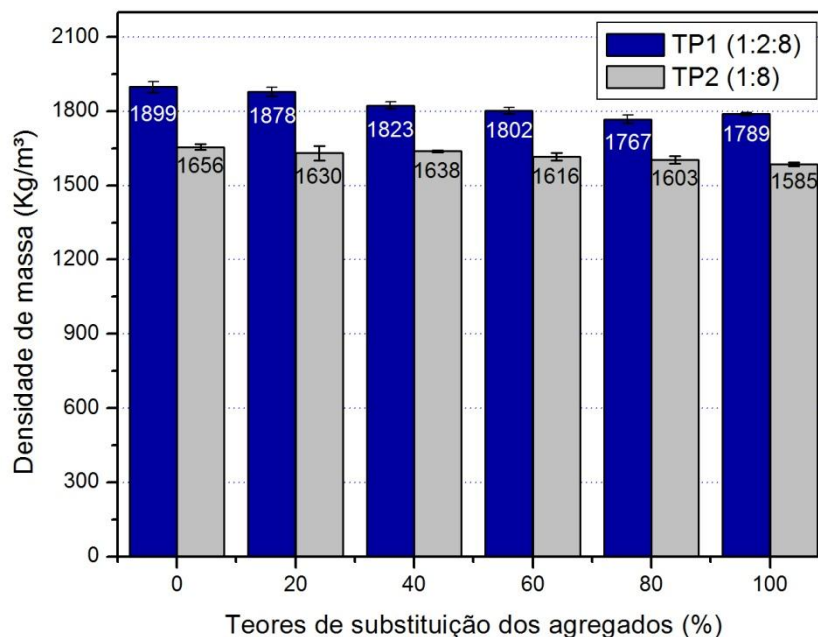


Figura 4.12 Densidade de massa das argamassas no Estado Endurecido para as formulações TP1 e TP2

Na formulação TP1 ocorreu uma diminuição na densidade de massa no estado endurecido, situação inversa ao ocorrido no estado fresco, para as mesmas formulações. Isso se deve principalmente, ao fato de no estado fresco ocorrer um aumento na densidade em virtude do acréscimo de água correspondente a substituição gradativa de agregados. No estado endurecido, parte dessa água participa dos processos de reação de hidratação do cimento e parte da mesma foi evaporada durante o processo de cura, diminuindo assim a densidade no decorrer do tempo.

Na formulação TP2, como a relação a/c foi mantida, a densidade de massa decresceu conforme a substituição dos agregados, ratificando o que aconteceu durante o estado fresco. Consequentemente, para esta formulação, a utilização de agregados reciclados, proporcionou argamassas menos densas, comparadas com as argamassas produzidas com agregados naturais.

Heineck et al (2013) utilizou em sua pesquisa a formulação de 1:1:6 (cimento:cal:agregado) em volume e concluiu que as argamassas produzidas apresentaram diferenças de densidade de massa, que é menor na argamassa com agregado reciclado. Para a argamassa padrão, o pesquisador observou que a

densidade de massa foi superior, pois resultou em um melhor empacotamento, menor volume de vazios, produzindo assim, argamassas com maior densidade de massa no estado endurecido.

De acordo com Carasek (2007) apud Paixão (2013), a densidade de massa das argamassas varia com o teor de ar (principalmente se for incorporado por meio de aditivos) e com a massa específica dos materiais constituintes da argamassa, prioritariamente do agregado.

4.2.2.2 Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados para todas as substituições e para as duas formulações definidas na pesquisa.

Na Figura 4.13 estão apresentados os valores obtidos para a formulação TP1 aos 7 e 28 dias e na Figura 4.14 estão os valores obtidos para a formulação TP2 aos 7 e 28 dias.

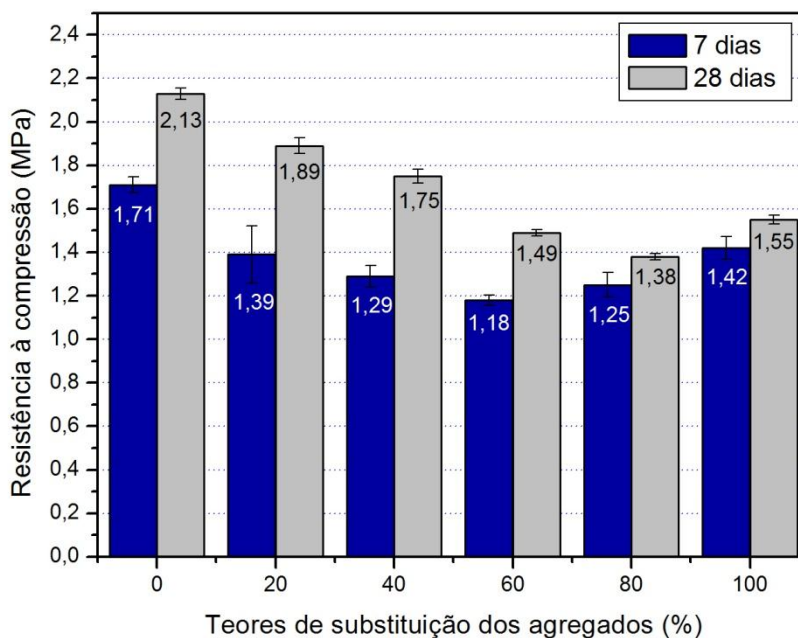


Figura 4.13 Resistência à compressão das argamassas para a formulação TP1

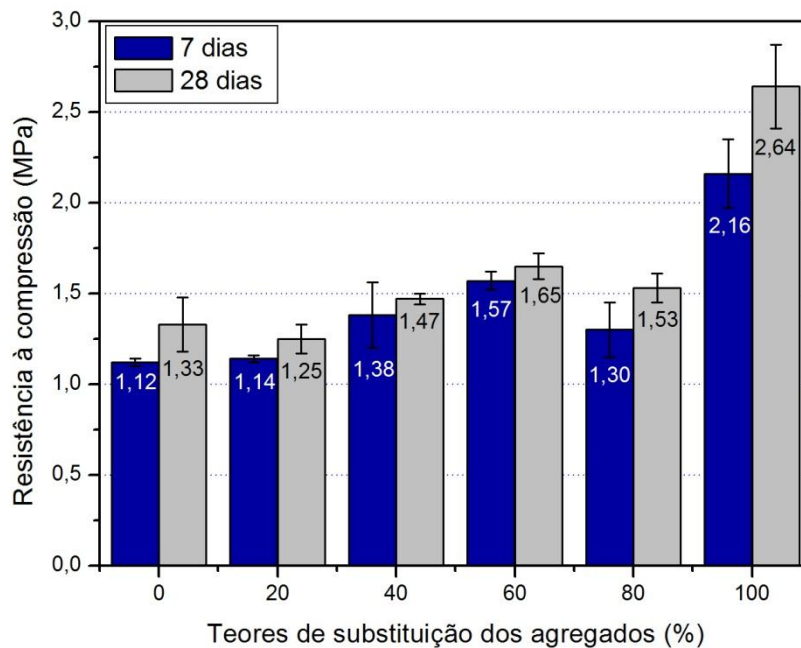


Figura 4.14 Resistência à compressão das argamassas para a formulação TP2

Pode-se observar, analisando o gráfico da Figura 4.13, que houve um decréscimo da resistência à compressão, à medida que se aumentou o percentual de agregado reciclado e consequente aumento da quantidade de água requerida para a trabalhabilidade, o que ocasiona uma redução na resistência à compressão. Mesmo assim, o decréscimo de resistência à compressão não inviabiliza a utilização de agregados reciclados, pois a redução não é tão significativa.

Para a formulação TP2, ocorreu um efeito inverso. Comparando-se os resultados apresentados na Figura 4.14, observa-se um incremento na resistência à compressão das argamassas, a partir do aumento no percentual de agregados reciclados. Isso se deve principalmente ao melhor empacotamento obtido pela distribuição granulométrica dos agregados reciclados, assim como, a manutenção da mesma quantidade de água para todos os percentuais de substituição dos agregados.

4.2.2.3 Resistência à tração na flexão

Pode-se observar ao se analisar as Figuras 4.15 e 4.16 que o comportamento das argamassas quanto à resistência à tração na flexão, apresenta-se semelhante ao da resistência à compressão, onde existe uma forte dependência da relação a/c. Quando mantida a quantidade de água da mistura, a resistência a tração na flexão apresenta-se superior, justificando-se a utilização dos agregados reciclados.

Para a formulação TP1, houve uma queda de resistência com as substituições dos agregados naturais pelos agregados reciclados. A resistência à tração na flexão para o traço de referencia foi de 0,90 MPa e o resultado obtido para 100% de substituição foi de 0,77 MPa, para a idade de 7 dias. O resultado obtido aos 28 dias apresenta a resistência à tração na flexão para o traço de referência de 0,98 MPa e para 100% de substituição, chegou-se a um valor de 0,78 MPa.

Para a formulação TP2 tem-se um acréscimo de resistência incrementada com a substituição dos agregados. Aos 7 dias tem-se 0,32 MPa para o traço de referência e 0,58 MPa para o traço com 100% de substituição. Aos 28 dias tem-se 0,57 MPa para o traço de referencia e 0,63 Mpa para o traço com 100% de substituição.

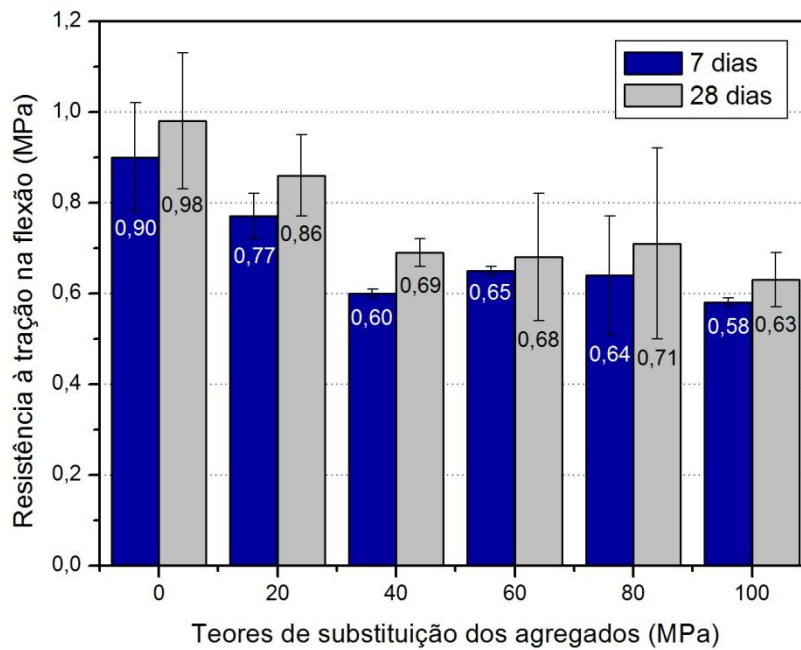


Figura 4.15 Resistência à tração na flexão das argamassas para a formulação TP1

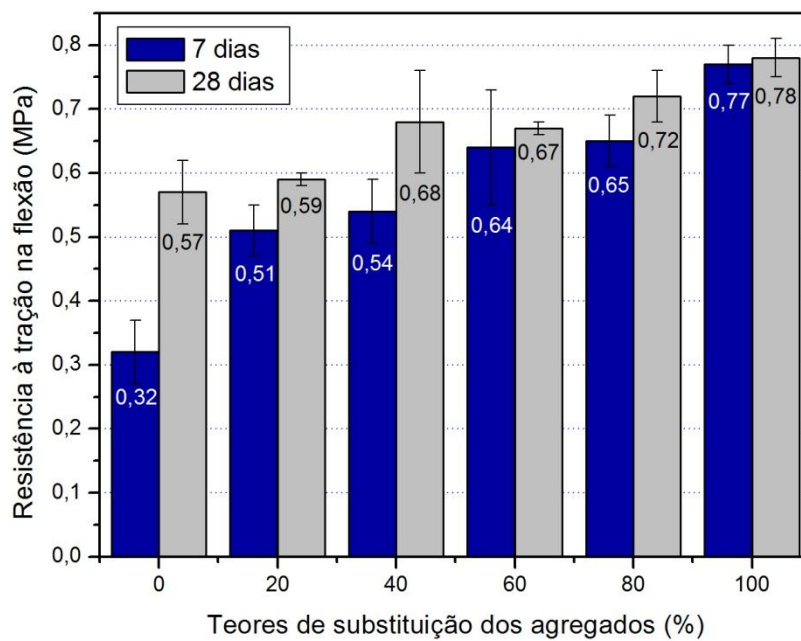


Figura 4.16 Resistência à tração na flexão das argamassas para a formulação TP2

4.2.3 Análise da Etapa Preliminar

Como descrito anteriormente, o objetivo da realização da etapa preliminar era de se obter informações das principais modificações causadas com a substituição dos agregados naturais pelos reciclados, e subsidiar a decisão quanto ao traço a ser escolhido para a pesquisa. Com isso, utilizaram-se duas formulações para o desenvolvimento dos ensaios.

Como a formulação TP1 (1:2:8) requer cal como aglomerante, houve a necessidade de se realizar o processo de maturação. Com isso, parte da água de amassamento era absorvida pelos agregados reciclados durante este processo. Sendo assim, houve a necessidade de aumentar o volume de água a partir das substituições dos agregados previstas na pesquisa. Como consequência, tem-se a produção de argamassas mais densas e com valores de resistência a compressão e a tração na flexão abaixo dos valores obtidos para o traço de referência.

Para a formulação TP2 (1:8), observou-se a necessidade de utilização de um aditivo plastificante para obtenção da consistência adequada, de modo a manter a mesma quantidade de água para todos os traços. Com isso, obtiveram-se argamassas menos densas e com valores de resistência a tração na flexão e a compressão com certo acréscimo comparada às argamassas de referência.

A partir da etapa preliminar ficou definida a realização dos ensaios definitivos utilizando apenas a formulação TP2, justificado pelo fato de que a utilização da formulação TP1 conduziria a pesquisa a duas variáveis de estudo: uma provocada pela substituição dos agregados e outra em função da necessidade de se estudar meios para manter a quantidade de água e obter a consistência desejada.

Em função do exposto, os ensaios definitivos foram realizados utilizando-se a formulação TP2 (1:8) com aditivo plastificante.

4.3 Ensaios Definitivos

4.3.1 Propriedades das Argamassas no Estado Fresco

4.3.1.1 Índice de Consistência

Os resultados dos ensaios para determinação dos Índices de consistência estão apresentados na figura 4.17.

Observa-se que todas as substituições ficaram dentro da faixa exigida pela NBR 13276 (ABNT, 2005), o que era esperado visto que a consistência e a quantidade de água foram fixadas no planejamento da pesquisa.

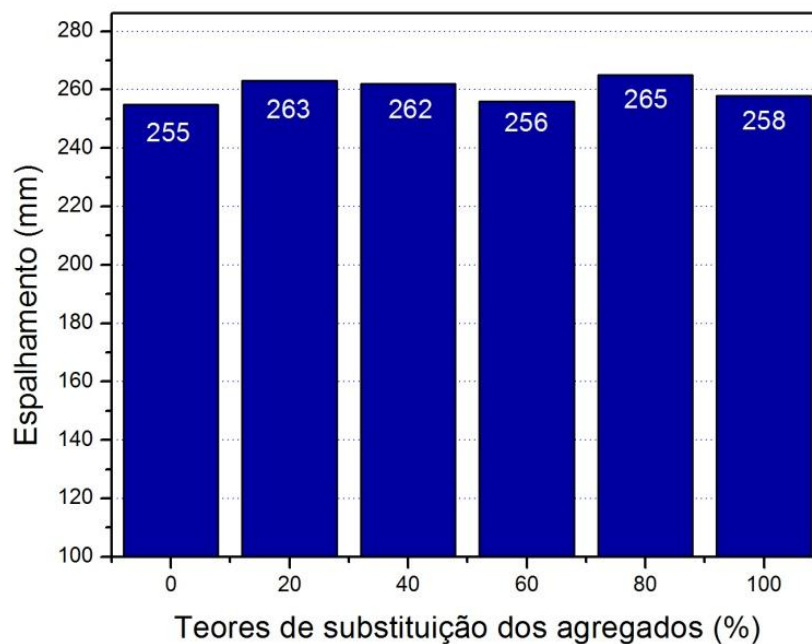


Figura 4.17 Espalhamento obtido para o ensaio de Índice de Consistência

4.3.1.2 Densidade de Massa e Teor de ar incorporado

O ensaio para a determinação da densidade de massa no estado fresco das argamassas produzidas na pesquisa foi realizado para todos os teores de substituição e os resultados estão apresentados na Figura 4.18.

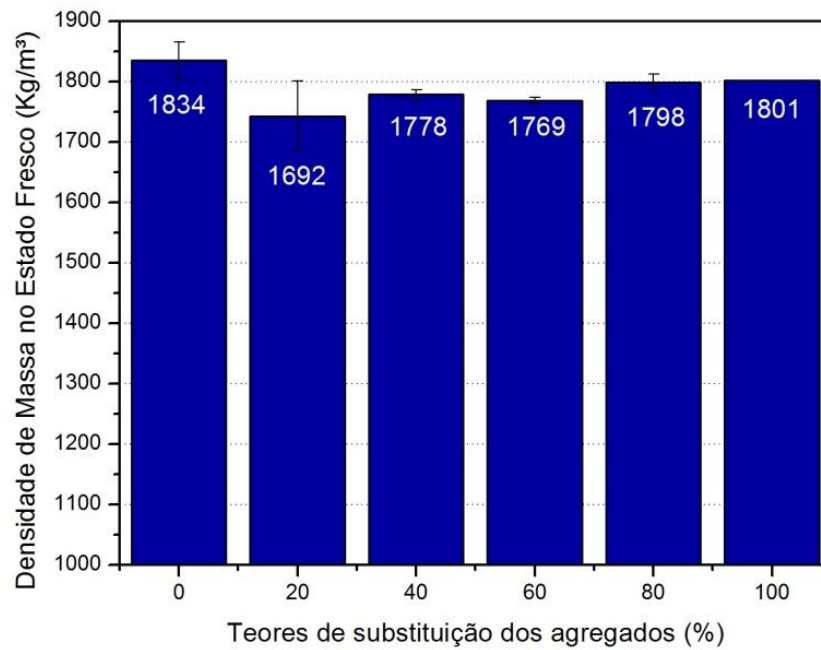


Figura 4.18 Densidade de massa das argamassas no estado fresco

A partir dos resultados da densidade de massa no estado fresco e das massas específicas dos materiais utilizados, obteve-se o resultado para o teor de ar incorporando que são apresentados na Figura 4.19.

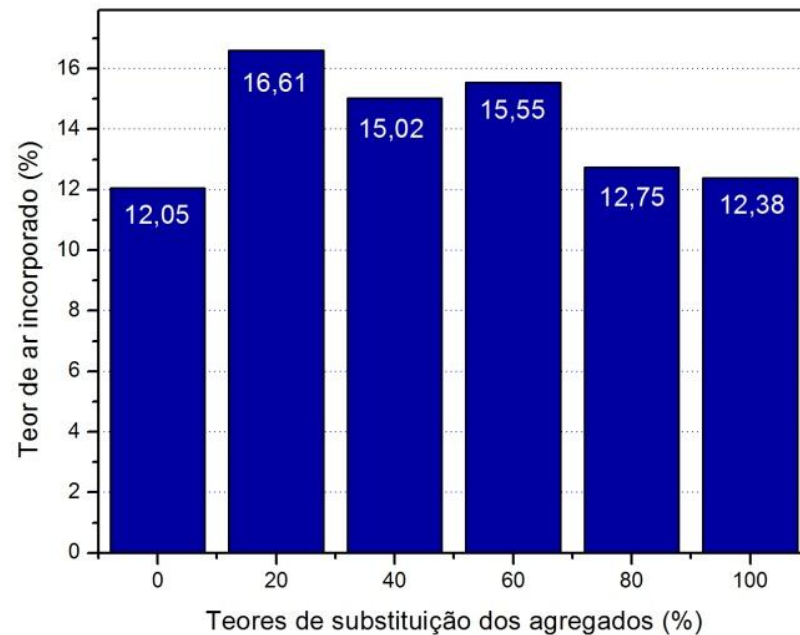


Figura 4.19 Teor de ar incorporado das argamassas

Os resultados obtidos mostram que há uma diminuição na densidade de massa das argamassas produzidas e um aumento no teor de ar incorporado, na medida em que são substituídos os agregados naturais pelos agregados reciclados. Os valores menores de densidade de massa são para as argamassas produzidas com percentuais de substituição de 20%, 40% e 60%, que obtiveram consequentemente valores maiores de teor de ar incorporado, justificado principalmente pela utilização de maiores porcentagens de teor de aditivo.

Os valores obtidos para densidade de massa se justificam pela adição de agregados reciclados, por serem mais leves comparados aos agregados naturais e pelo aumento nos teores de ar incorporado, justificado pela utilização de aditivo.

Os resultados encontrados corroboram os obtidos por Silva et al (2009), onde eles concluíram que o uso de aditivo em argamassas para revestimento favorecem a trabalhabilidade e a redução do consumo de materiais. Segundo os pesquisadores, esses fatores contribuem para a diminuição do consumo de água, reduzindo a capilaridade e a densidade de massa e aumentando o teor de ar incorporado nas argamassas produzidas.

4.3.1.3 Retenção de Água

Os resultados obtidos no ensaio para retenção de água estão expostos na Figura 4.20, onde se verifica um aumento gradativo a partir da substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados.

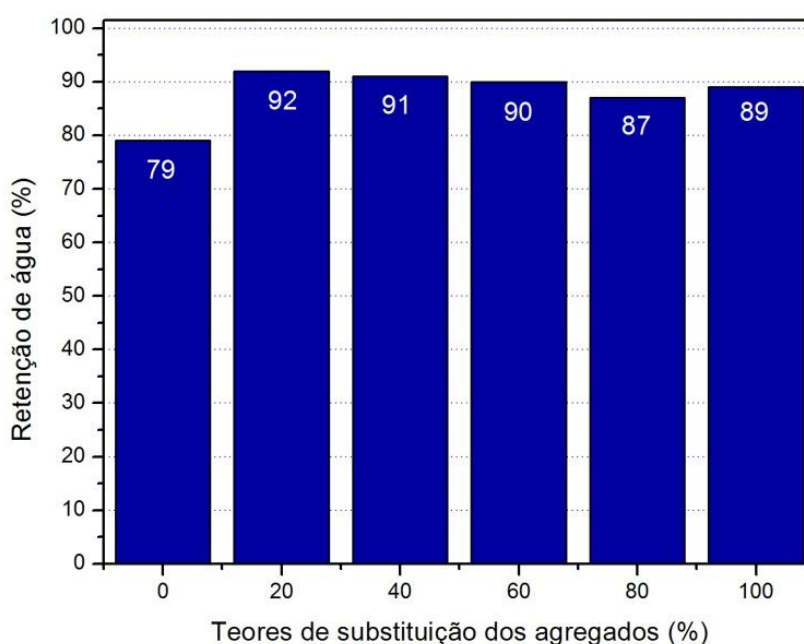


Figura 4.20 Retenção de água para as argamassas

Verificou-se que apesar da variação em termos de retenção de água, as argamassas mantiveram bons resultados em termos de retenção. A partir dos valores obtidos, observa-se o aumento na propriedade de retenção de água para as argamassas produzidas com 100% de substituição de agregados naturais pelos agregados reciclados.

Os resultados foram compatíveis com os obtidos por Jochem (2012), onde utilizando resíduos de construção e resíduos cerâmicos, chegou-se a resultados em torno de 98% de retenção. Em seus estudos, a pesquisadora define a importância dessa propriedade, colaborando para uma melhor hidratação do cimento e consequentemente diminuindo a retração e o surgimento de fissuras ao longo de tempo.

A classificação prevista na NBR 13281 (ABNT, 2005) está apresentada na Tabela 4.3, juntamente com a classificação onde as argamassas produzidas na pesquisa foram enquadradas.

Tabela 4.3 Classificação para os índices de retenção de água

Classe	Retenção de Água (%)	Classificação	Método de Ensaio
U1	≤ 78		
U2	72 a 85	Padrão	
U3	80 a 90		
U4	86 a 94	60%, 80% e 100%	ABNT NBR 13280:2005
U5	91 a 97	20% e 40%	
U6	95 a 100		

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Através da classificação proposta pela NBR 13281 (ABNT, 2005), observa-se que as argamassas produzidas na pesquisa, não permaneceram na mesma faixa de classificação. Isso se justifica pela variação dos níveis de retenção de água obtidos.

4.3.2 Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido

4.3.2.1 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a realização das análises microscópicas das argamassas produzidas na pesquisa, foram retiradas algumas amostras sólidas da argamassa padrão e das argamassas com percentuais de substituição de 40%, 60% e 100% dos agregados naturais pelos agregados reciclados.

4.3.2.1.1 Argamassa Padrão

A Figura 4.21 ilustra a microestrutura obtida para a amostra de argamassa produzida com o traço padrão, ou seja, onde foram utilizados apenas agregados naturais.

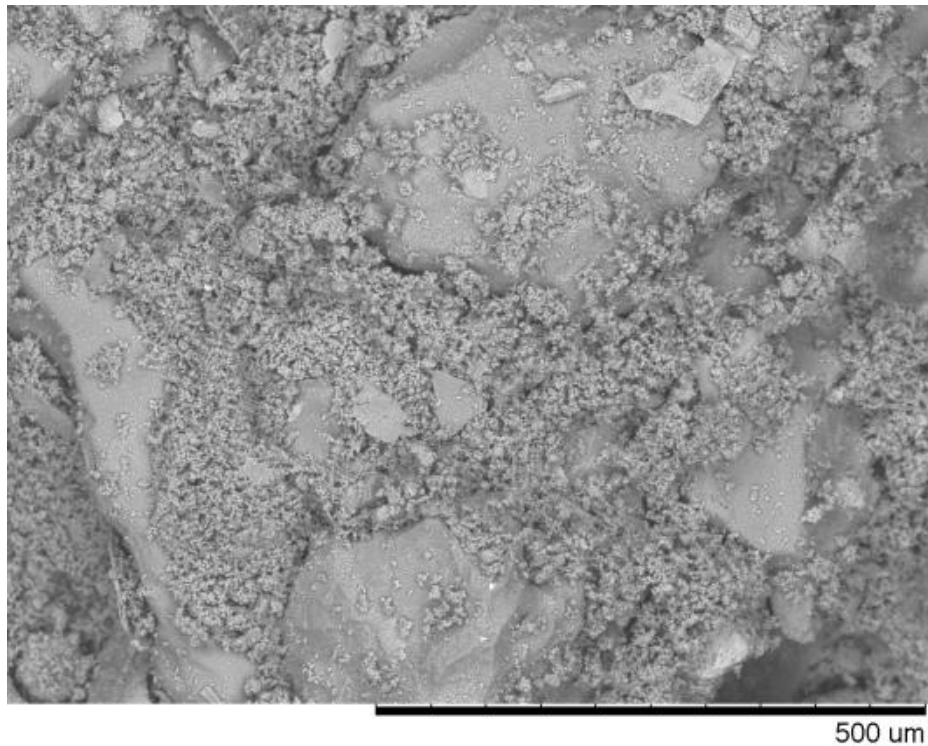


Figura 4.21 MEV para argamassa padrão para uma ampliação de 200x

Observa-se que os grãos de agregados encontram-se envolvidos pela pasta de cimento, porém apresentando certo comprometimento em termos de aderência. Isso pode ser justificado principalmente pela superfície lisa dos agregados naturais que proporciona uma aderência menor.

Na Figura 4.22 é apresentado o resultado do EDS, onde se observa como principais componentes da mistura a Si e o Ca, onde suas reações são responsáveis por formar o silicato de cálcio hidratado.

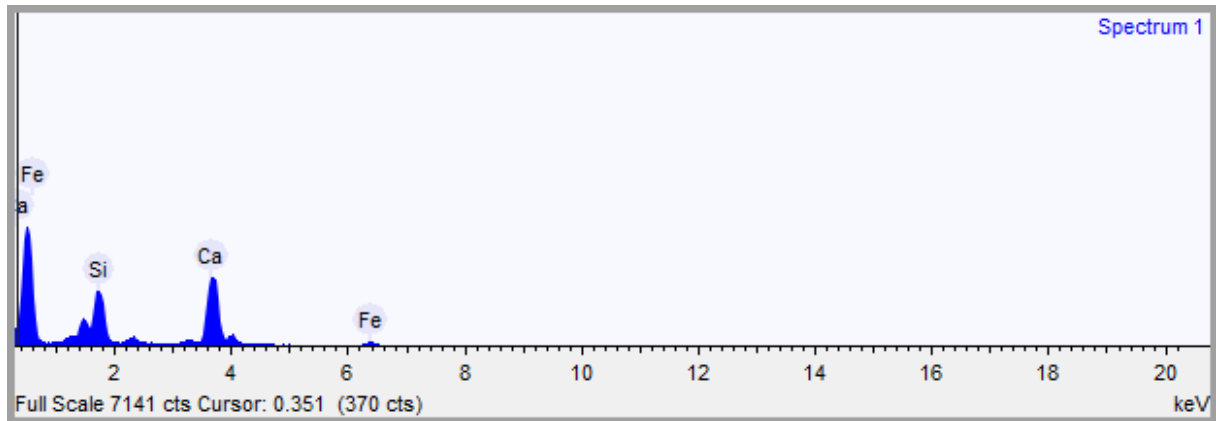


Figura 4.22 EDS para argamassa padrão

4.3.2.1.2 Argamassa com percentual de 40% de substituição

Na figura 4.23, tem-se a micrografia para argamassas produzidas com 40% de substituição dos agregados. Observa-se um melhor envolvimento entre pasta-agregado e porosidade mais acentuada comparada às apresentadas pela argamassa padrão.

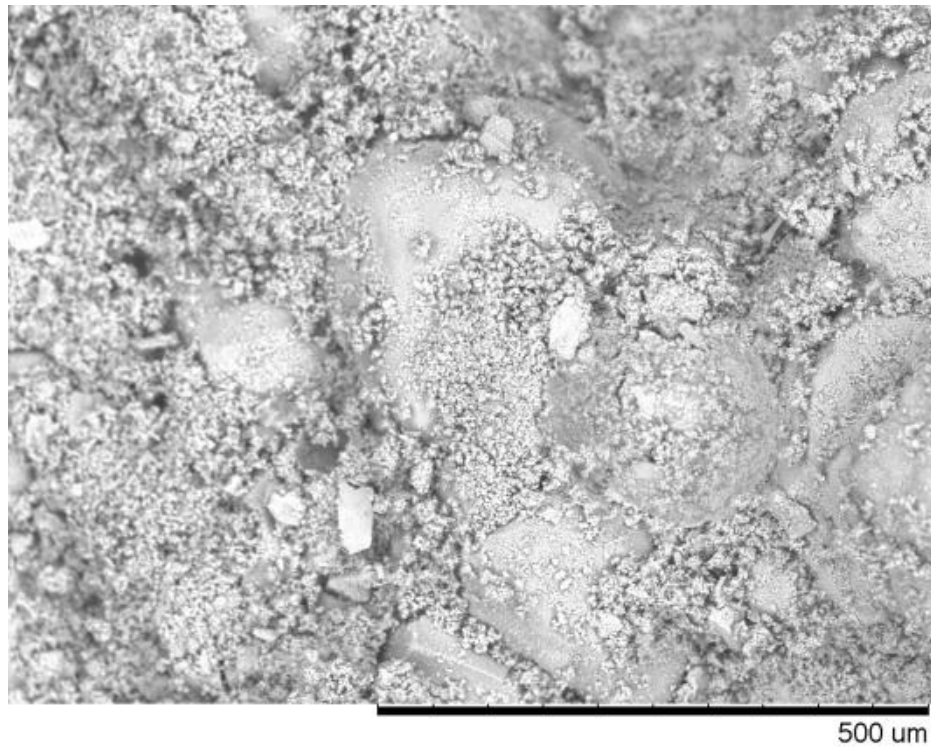


Figura 4.23 MEV para argamassa com substituição de 40% para uma ampliação 200x

Na Figura 4.24, apresenta-se o EDS realizado para uma ampliação de 3000x. Observam-se os componentes Si, Ca, Al e Fe como elementos predominantes na mistura. As reações do Ca e Si promoveu a formação do silicato de cálcio hidratado e a presença do alumínio contribuiu na formação da etringita.

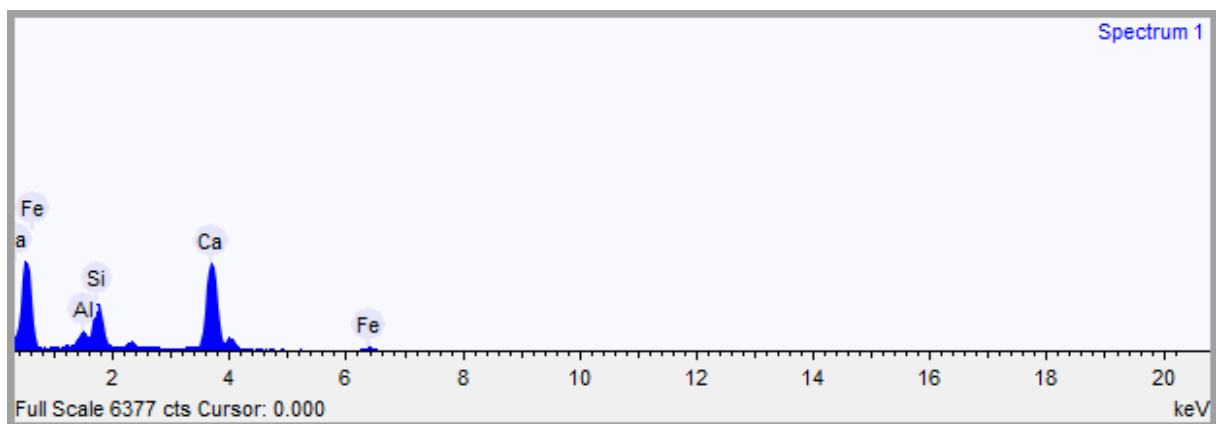


Figura 4.244 EDS para argamassa com substituição de 40%

4.3.2.1.3 Argamassa com percentual de 60% de substituição

As micrografias apresentadas nas Figuras 4.25 apresenta a microestrutura para argamassas produzidas com 60% de substituição dos agregados. A partir destas, observa-se comportamento similar às argamassas com 40% de substituição.

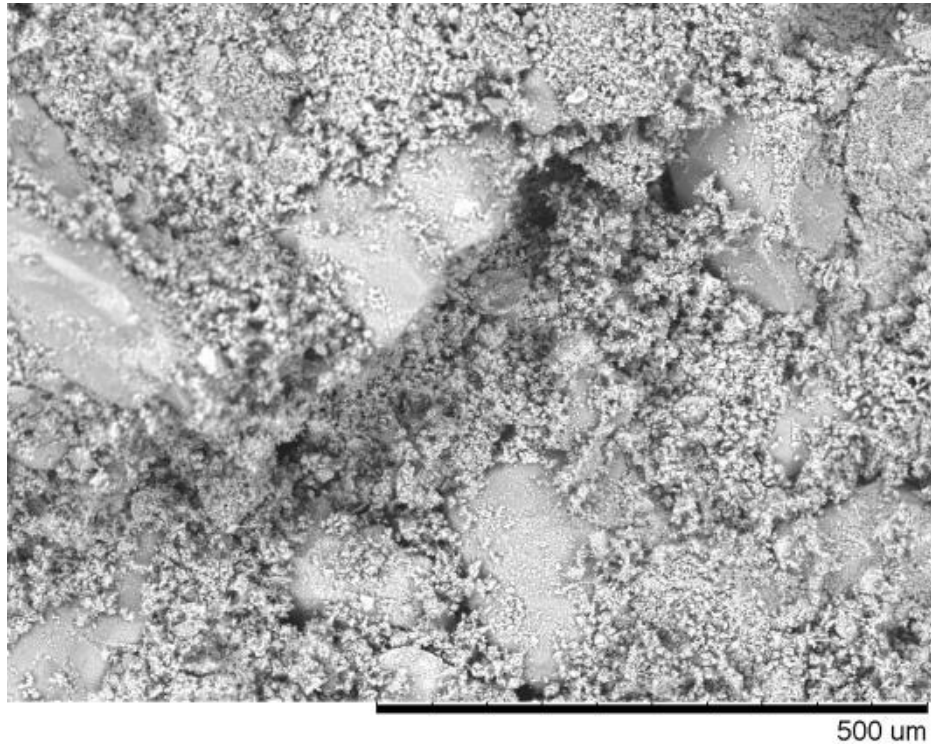


Figura 4.25 MEV para argamassa com substituição de 60% para uma ampliação

O EDS apresentado na Figura 4.26 foi realizado para uma ampliação de 3000x. Observam-se os componentes Si, Ca, Al, Na e Fe como elementos predominantes na mistura.

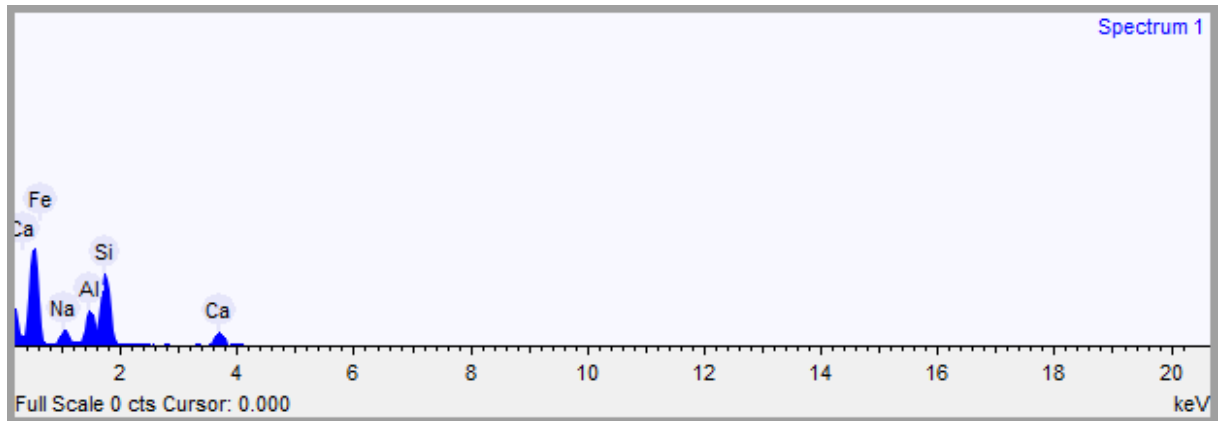


Figura 4.26 EDS para argamassa com substituição de 60%

4.3.2.1.4 Argamassa com percentual de 100% de substituição

A Figura 4.27 ilustra a microestrutura obtida para a amostra de argamassa produzida para o percentual de 100% de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados. Observa-se um melhor envolvimento da pasta de cimento com os grãos de agregados. A melhor aderência pode ser justificada pela forma esférica, textura rugosa e maior área superficial apresentada pelos agregados reciclados.

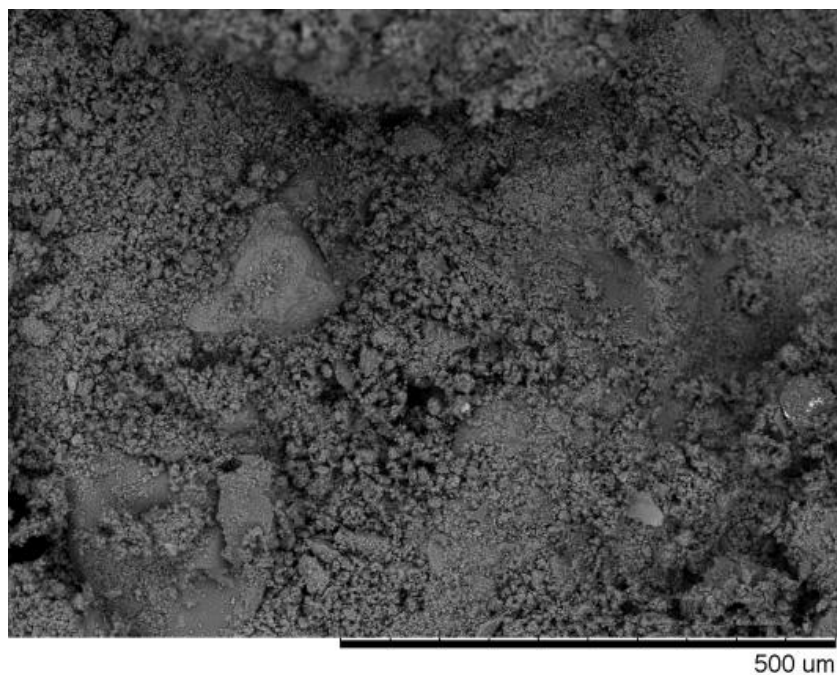


Figura 4.27 MEV para argamassa com substituição de 100% para uma ampliação 200x

O EDS realizado para uma ampliação de 3000x apresenta como componentes principais os elementos de Fe, Si, Ca e Al, conforme observa-se nos picos apresentados na Figura 4.28.

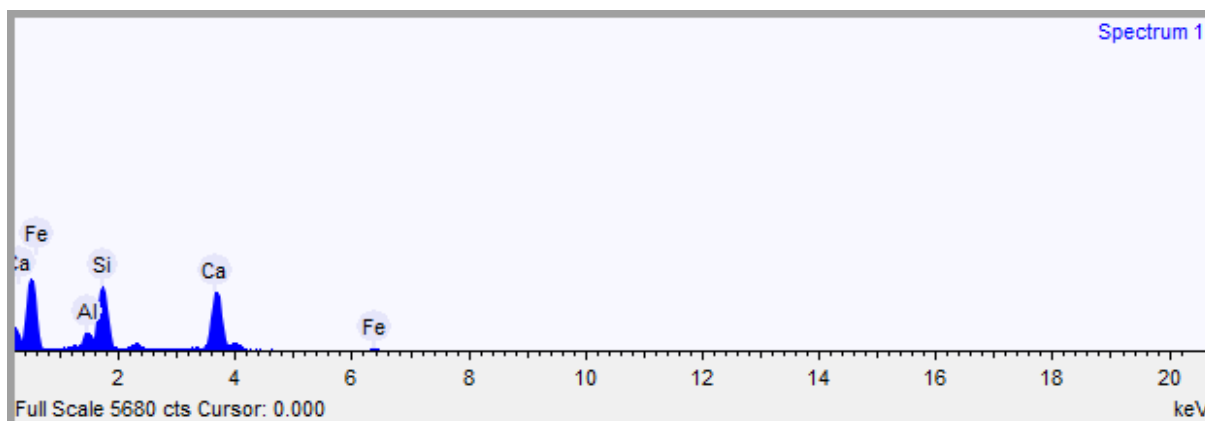


Figura 4.28 EDS para argamassa com substituição de 100%

As análises obtidas a partir da visualização das micrografias das argamassas proporcionaram algumas informações importantes que servirão para justificar algumas variações obtidas no decorrer da pesquisa. Observa-se que a estrutura rugosa dos agregados reciclados favoreceu a aderência do sistema, o que irá refletir nos valores obtidos para resistência mecânica final das argamassas.

Através das análises microscópicas, observou-se também uma variação no diâmetro dos poros, principalmente para as argamassas com percentuais de substituição intermediárias (40% e 60%). Comparando-se as micrografias 4.23 e 4.27, referentes às argamassas padrão e com percentual de 100% de substituição, observou-se que a variação no diâmetro dos poros aumentou, porém não de maneira significativa.

4.3.2.2 Densidade de Massa no Estado Endurecido

Os dados obtidos para o ensaio para determinação da densidade de massa no estado endurecido estão apresentados na Figura 4.29.

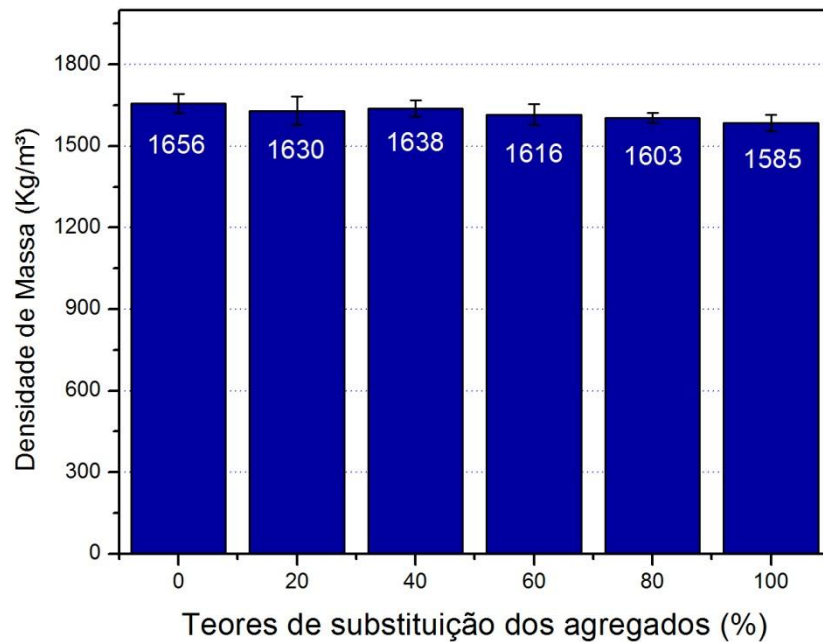


Figura 4.29 Densidade de massa no estado endurecido

Os valores obtidos para densidade de massa apresentam uma redução a partir da substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados. Isso se justifica pela utilização de agregados mais leves e pelo melhor empacotamento dos grãos em virtude da finura dos agregados utilizados no preparo das argamassas.

A partir da classificação proposta pela NBR 13280 (ABNT, 2005), as argamassas padrão e as produzidas com percentuais de substituição de 20%, 40%, 60% e 80%, se enquadram na classificação M5, conforme Tabela 4.4. As argamassas produzidas com percentuais de 100% de substituição ficaram em outra faixa de classificação (M4), confirmando a diminuição dos valores de densidade de massa.

Tabela 4.4 Valores para classificação das argamassas em função da densidade de massa

Classe	Densidade de massa no estado endurecido (Kg/m ³)	Classificação	Método de Ensaio
M1	≤ 1200		
M2	1000 a 1400		
M3	1200 a 1600		
M4	1400 a 1800	100%	ABNT NBR 13280:2005
M5	1600 a 2000	Padrão, 20%, 40% e 60%	
M6	> 1800		

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

4.3.2.3 Absorção de Água por capilaridade

Os índices de absorção de água obtidos mostram que a absorção de água por capilaridade decresce em função da substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados.

A Figura 4.30 apresenta a maior absorção para a argamassa padrão com 1,97%, enquanto que a menor absorção foi de 0,83% para as argamassas produzidas com percentual de 100% de substituição.

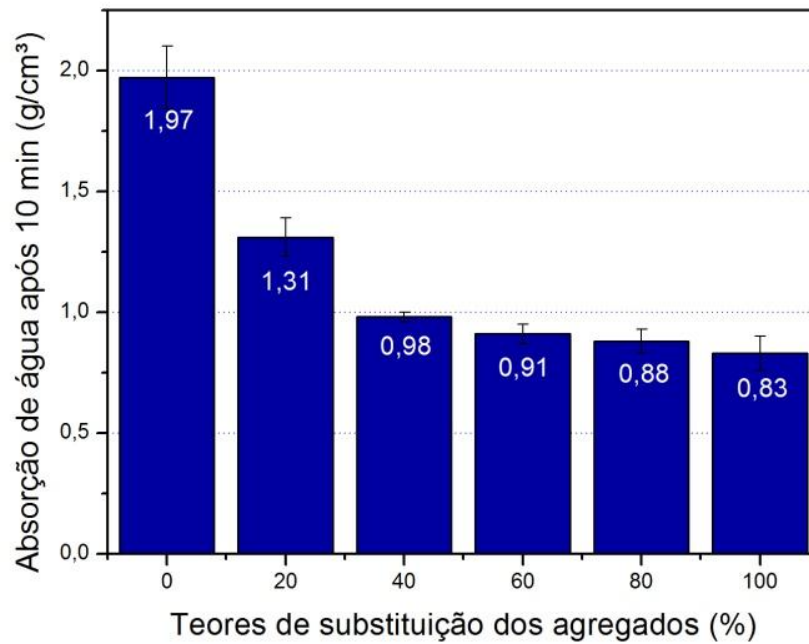


Figura 4.30 Absorção de água por capilaridade aos 10 min

Na Figura 4.31, tem-se comportamento similar ao apresentado pelas argamassas na absorção aos 10 min. Aos 90 min a argamassa padrão apresentou índice de absorção de 3,70% enquanto que as argamassas com 100% de substituição apresentaram 2,16% de absorção.

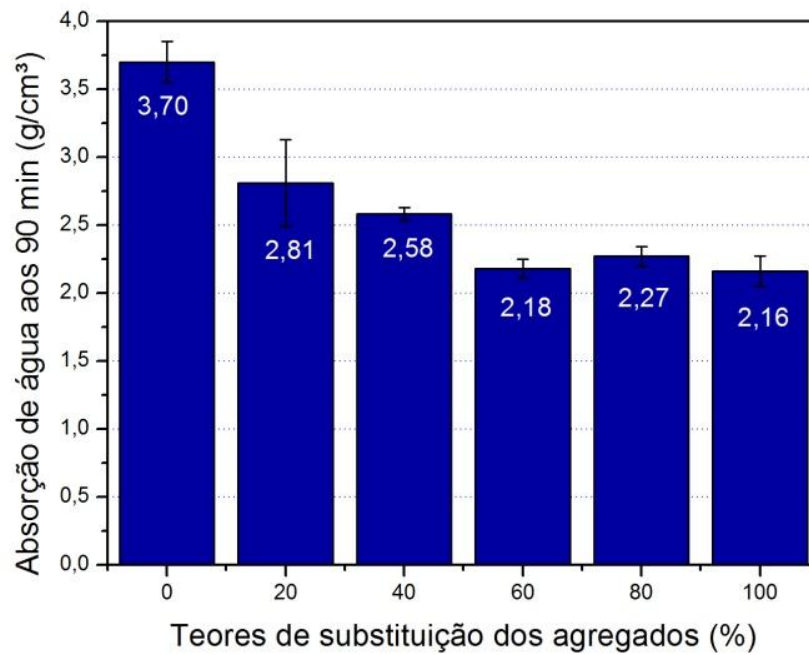


Figura 4.31 Absorção de água por capilaridade aos 90 min

O coeficiente de capilaridade das argamassas sofreu redução com a substituição dos agregados naturais pelo reciclado, como se observa na Figura 4.32. Isso se justifica provavelmente, pela redução dos raios dos capilares em função de um melhor empacotamento das argamassas com substituição.

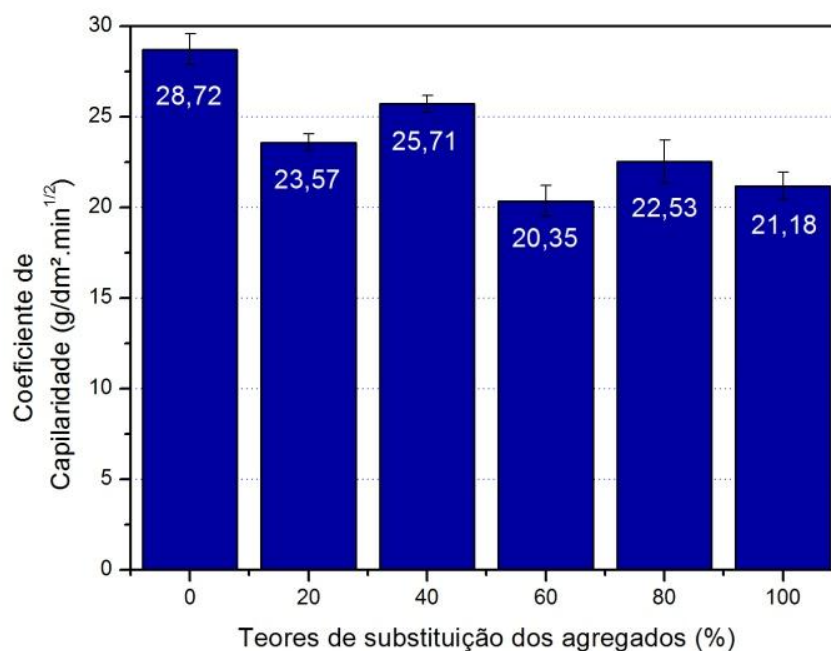


Figura 4.32 Coeficiente de capilaridade

Apesar das variações obtidas, as argamassas apresentaram elevados coeficientes de capilaridade, ficando todas dentro da mesma faixa de classificação (C3), conforme se observa na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Classificação das argamassas em função do coeficiente de capilaridade

Classe	Coeficiente de Capilaridade g/dm².min ^{1/2}	Classificação	Método de Ensaio
C1	≤ 1,5		
C2	1,0 a 2,5		
C3	2,0 a 4,0	Padrão, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%	ABNT NBR 15259:2005
C4	3,0 a 7,0		
C5	5,0 a 12,0		
C6	> 10,0		

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

4.3.2.4 Absorção de Água e Índice de Vazios

Os resultados para os valores obtidos nos ensaios de absorção de água e de índice de vazios estão apresentados nas Figuras 4.33 e 4.34, respectivamente.

As argamassas produzidas com agregados reciclados apresentaram índice de vazios mais elevados. As argamassas produzidas com 40% de substituição apresentaram os índices mais elevados com 38,5%. A argamassa padrão apresentou 34,9% e a argamassa produzida com 100% de substituição apresentou 35,7%.

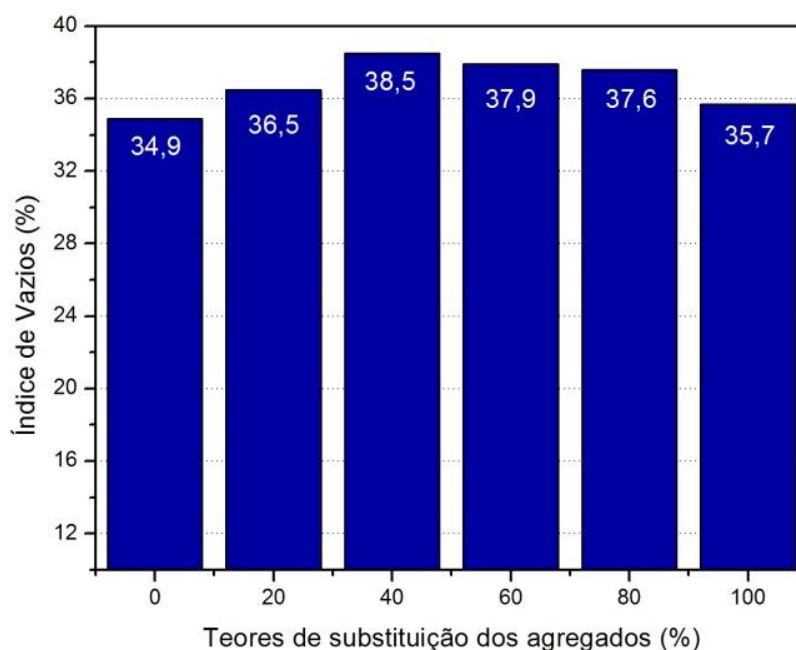


Figura 4.333 Índice de Vazios obtidos para as argamassas produzidas para diferentes percentuais de substituição dos agregados naturais pelos reciclados

A absorção de água está ligada diretamente ao índice de vazios das argamassas. As argamassas que apresentam índice de vazios elevados tendem a apresentar elevados índices de absorção, devido principalmente a permeabilidade e porosidade que apresentam.

Na pesquisa, os resultados de absorção indicam elevados índices para as argamassas produzidas com agregados reciclados, apresentando 25,5% de

absorção para as argamassas com 40% de substituição. A argamassa padrão apresentou 21,9% de absorção e a argamassa com 100% de substituição apresentou 23,5%.

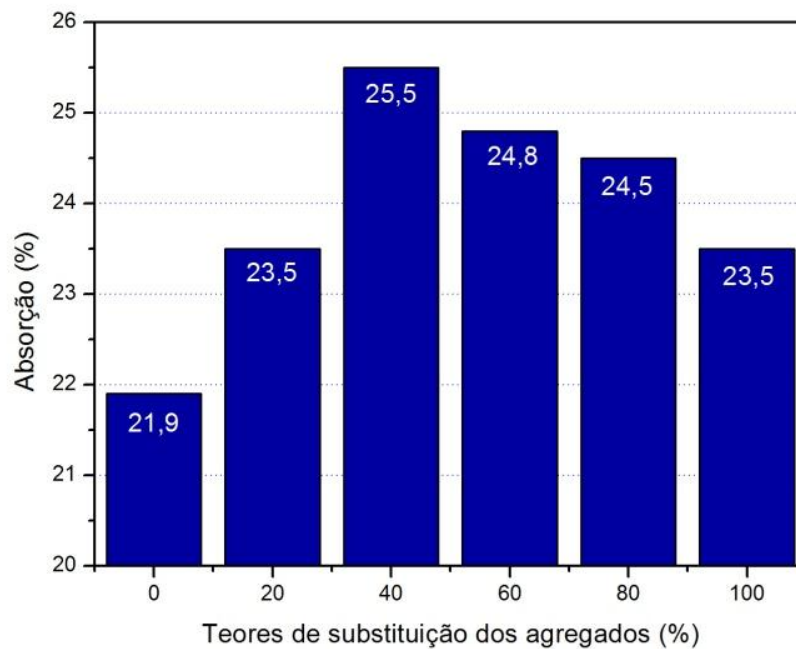


Figura 4.344 Absorção de água das argamassas produzidas para diferentes percentuais de substituição dos agregados naturais pelos reciclados

4.3.2.5 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas foi realizado aos 28 dias e foram determinados os valores apresentados na Figura 4.35.

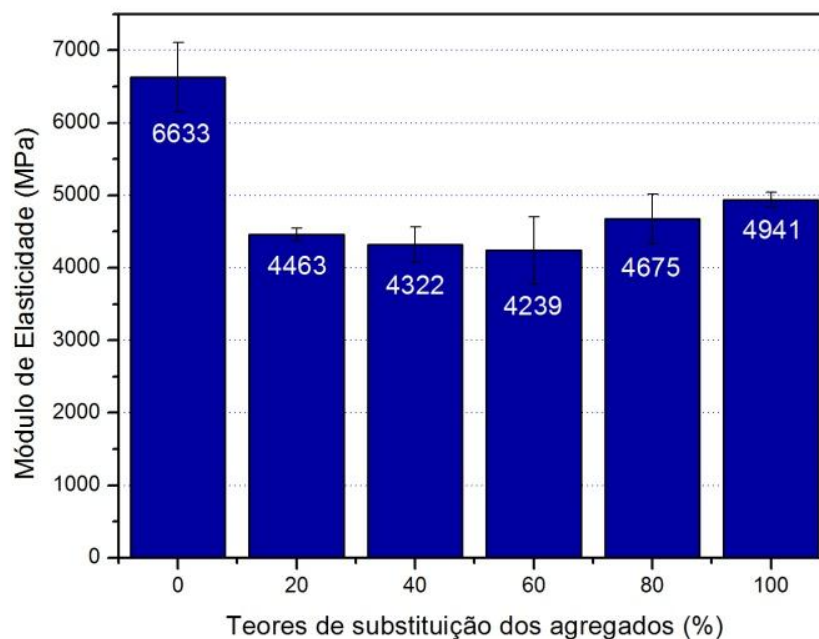


Figura 4.35 Módulo de elasticidade dinâmico

Dentre os resultados obtidos, observa-se uma diminuição nos valores dos módulos de elasticidades das argamassas produzidas com agregados reciclados. O maior valor obtido foi para a argamassa padrão 6.633 MPa e dentre as argamassas com substituições o maior valor obtido foi para a argamassa produzida com 100% de substituição, com 4.941 MPa. Tal desempenho mostra-se favorável ao uso do agregado reciclado, por resultar em uma argamassa com maior capacidade de absorver deformações.

Observa-se que a medida que aumenta a relação agregado reciclado/aglomerante, diminui o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas produzidas. Com o aumento da compactidade e do empacotamento do conjunto aglomerante e agregado, muito provavelmente ocasionado pelo aumento do teor de finos presentes nos agregados reciclados, aumenta a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e, conseqüentemente, diminui o tempo de propagação da onda, caracterizando o aumento do módulo de elasticidade.

Segundo Barra (2011), o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas permite perceber a sua capacidade de fissuração e o nível de deformação. O pesquisador ainda observa que valores de módulo de elasticidade elevados

correspondem a materiais mais rígidos e valores baixos correspondem a materiais com elevada deformabilidade.

4.3.2.6 Resistência à Tração na Flexão

A média dos ensaios de resistência à tração na flexão obtida para as argamassas produzidas e ensaiadas aos 7 e 28 dias, estão representados nas Figura 4.36.

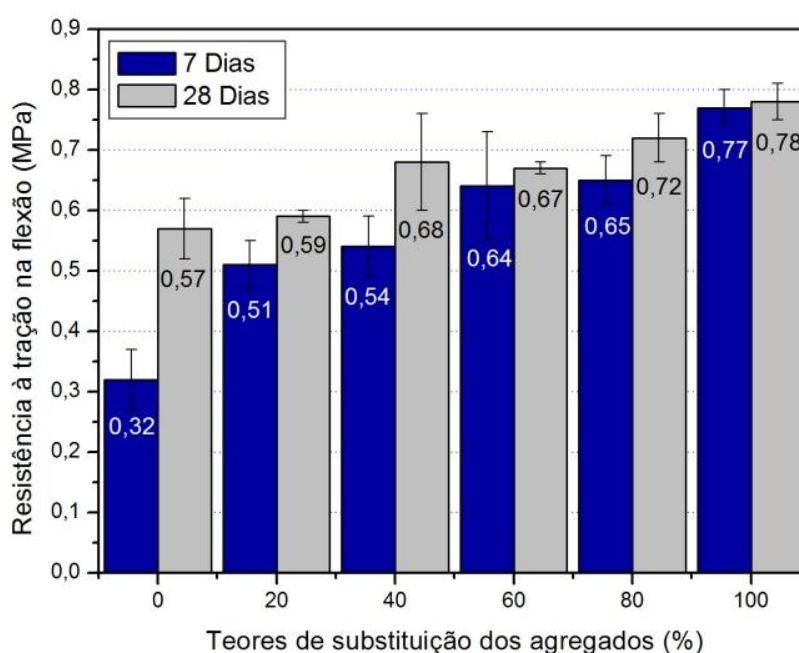


Figura 4.36 Resistência a tração na flexão obtida aos 7 e 28 dias

Observa-se um aumento na resistência a tração na flexão para todas as substituições, porém esse aumento não foi tão elevado e todas os valores obtidos enquadraram as argamassas no mesmo grupo de resistência.

A partir da classificação prevista na NBR 13281 (ABNT, 2005) apresentada na Tabela 4.6, as argamassas estão classificadas na mesma faixa de resistência, representadas pelo grupo R1.

Tabela 4.6 Classificação para resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Classificação	Método de Ensaio
R1	$\leq 1,5$	Padrão, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.	ABNT NBR 13279:2005
R2	1,0 a 2,0		
R3	1,5 a 2,7		
R4	2,0 a 3,5		
R5	2,7 a 4,5		
R6	$> 3,5$		

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

4.3.2.7 Resistência à Compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados aos 28 dias, também levou a certo incremento de resistência a compressão para todos os teores de substituição, conforme observa-se na Figura 4.37. Para a argamassa padrão a resistência a compressão obtida foi de 1,33 Mpa e para 100% de substituição o valor obtido foi de 2,64 Mpa, o que representa um incremento de 99% na resistência a compressão.

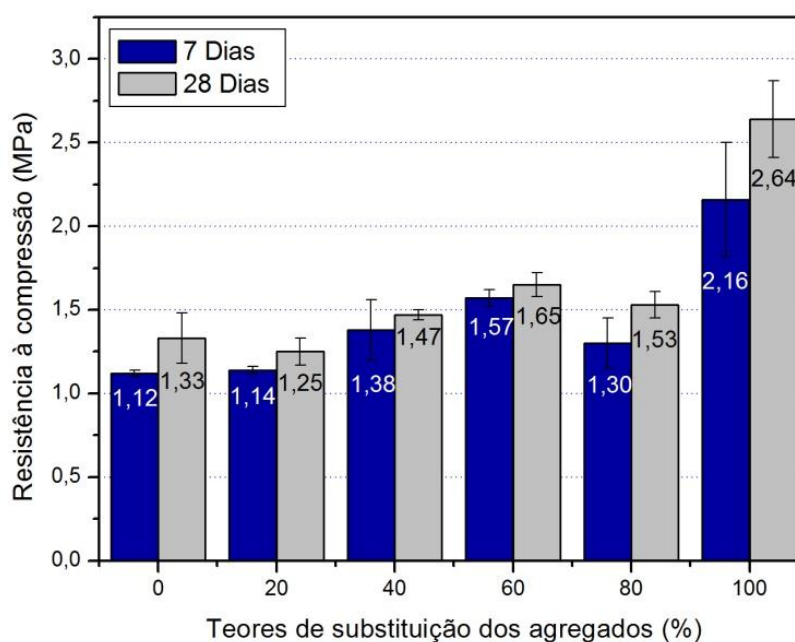


Figura 4.37 Valores de resistência à compressão obtidos aos 7 e 28 dias

De acordo com a classificação indicada na NBR 13281 (ABNT, 2005) apresentada na Tabela 4.7. A partir desta, observa-se o enquadramento da argamassa padrão e com 20% e 40% de substituição no grupo de resistência P1, as argamassas com 60% e 80% de substituição enquadrara-se no grupo de resistência P2 e a argamassa com 100% de substituição dos agregados no grupo de resistência P3. A classificação define a variação das argamassas produzidas para diferentes percentuais e o enquadramento em faixas de resistências diferentes.

Tabela 4.7 Classificação para resistência a compressão

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Classificação	Método de Ensaio
R1	≤ 2,0	Padrão, 20% e 40%	ABNT NBR 13279:2005
R2	1,5 a 3,0	60% e 80%	
R3	2,5 a 4,5	100%	
R4	4,0 a 6,5		
R5	5,5 a 9,0		
R6	> 8,0		

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Analisando os resultados apresentados na Figura 4.37, observa-se que o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado tende a aumentar a resistência à compressão. A granulometria contínua e a maior quantidade de finos apresentada pelo agregado reciclado auxiliam num melhor empacotamento das argamassas e contribuem para o fechamento dos vazios. Além disso, como o agregado reciclado possui maior absorção de água que o agregado natural, pode haver, ainda, maior aderência entre a pasta e o agregado justificado também pela elevada rugosidade dos agregados.

Em seus estudos, Cabral et al (2011) observou que a substituição do agregado natural pelo reciclado propiciou um incremento de resistência à compressão das argamassas em torno de 90% comparadas à argamassa padrão, sendo esse incremento de resistência atuante de forma não linear ao acréscimo de agregado, ou seja, o incremento de resistência não se deu de forma diretamente proporcional ao aumento nos percentuais de substituição dos agregados naturais pelos reciclados. O pesquisador conclui que esse incremento de resistência à compressão se justifica pela maior absorção de água pelos agregados reciclados, fazendo com que a argamassa produzida com estes retenham mais água, favorecendo os processos de hidratação dos grãos de cimento e formação de uma quantidade superior de cristais hidratados.

CAPITULO 5

5 Conclusão

As conclusões obtidas com a utilização de agregados reciclados em argamassas de revestimentos foram:

- Os agregados reciclados produzidos em Natal-RN são heterogêneos, apresentando composição química variável, com predominância de silício, alumínio e zircônia.
- A granulometria dos agregados reciclados produzidos na usina de Natal-RN apresenta uma distribuição granulométrica bem graduada, com elevada fração de finos.
- As argamassas produzidas com agregados reciclados demandam um maior consumo de água ou exigem a utilização de aditivos plastificantes para manter a consistência adequada.
- A densidade de massa no estado fresco para o traço TP1 (1:2:8) aumentou a partir da substituição dos agregados para todos os teores. Efeito inverso ocorreu para as argamassas produzidas com o traço TP2 (1:8).
- Para os resultados de densidade de massa no estado endurecido, ocorreu um decréscimo em função da substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados.
- A resistência à tração na flexão e à compressão para o traço TP1 (1:2:8) foram inferiores para as argamassas produzidas com agregados reciclados e o melhor resultado foi para 20% de substituição. Para o traço TP2 (1:8), ocorreu um incremento na resistência á tração e à compressão e o melhor resultado foi para 100% de substituição dos agregados naturais pelos reciclados.
- A retenção de água da argamassa padrão é inferior a das argamassas produzidas com agregados reciclados.

- A absorção de água e o índice de vazios foram superiores para as argamassas produzidas com 100% de substituição dos agregados naturais pelos reciclados.
- O módulo de elasticidade diminuiu com a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados. O maior valor obtido foi apresentado pela argamassa padrão e o menor valor obtido foi apresentado pela argamassa com 60% de substituição de agregados naturais pelos agregados reciclados.

Considerando-se todos os ensaios realizados, observa-se que os melhores resultados foram apresentados pelas argamassas produzidas com 100% de agregados reciclados, justificando sua utilização.

CAPITULO 6

6 Sugestões para trabalhos futuros

Com a realização da pesquisa, espera-se que haja uma contribuição que proporcione informações úteis para a utilização dos agregados reciclados e diminua o receio quanto a sua utilização pelo mercado local.

Em função da grande variabilidade proporcionada pelos agregados reciclados, alguns temas são sugeridos para a continuidade da pesquisa:

- Analisar e propor uma padronização granulometria para os agregados reciclados produzidos nas usinas de reciclagem locais;
- Realizar alguns ensaios para a caracterização dos agregados como absorção, teor de materiais pulverulentos e área superficial (BET);
- Analisar outras formulações utilizando proporções e aglomerantes diferentes;
- Realizar ensaios de aderência e retração das argamassas produzidas com agregados reciclados;
- Realizar ensaios de pozolanicidade no RCD;
- Realizar análises qualitativas das argamassas a partir de opiniões do pedreiro;
- Realizar análises de durabilidade das argamassas produzidas com esses agregados.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. ABCP. **Boletim técnico - Guia prático de utilização do cimento Portland**. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto- especificações. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão axial. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da densidade de massa aparente em estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa de Assentamento e Revestimento de paredes e Teto- Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113** - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114** - Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115** - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116** - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15258** - Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BAIA, L. L. M.; SABATTINI, F. H. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa**. 4. ed. São Paulo: Editora O nome da rosa, 2002.

BARBUDO, A. et al. **Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications**. Construction and building materials. Estados Unidos, ano 2012, v. 28, p.129-138. 30 mar. 2012.

BARRA, A. T. P. **Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Lisboa. Lisboa, 2011.

BERTOL, A. C. **Análise da correlação entre a geração de resíduos da construção civil e as características das obras**. 2013. 77 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Produção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BRAGA, M. **Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão – efeito filer e pozolanico**. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2011.

CABRAL, A. E. B., OLIVEIRA, M. E. D. **Argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de Fortaleza- CE, Brasil**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

CARASEK, H. Argamassa. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Vol 2, 2. ed atualizada e ampliada. São Paulo: IBRACON, 2010.

CARDOSO, J. R. A. **Uso do agregado de entulho da construção civil de Manaus – AM para obtenção de bloco de argamassa celular**. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Manaus, 2010.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M. Cal na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p. Cap 22.1.

CONAMA, **Resolução nº 307**. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Governo Federal. Ministério do Meio Ambiente: Brasília, 2002.

CORREA, B. C., CURSINO D., SILVA, G. **Viabilidade de Implantação de uma usina de reciclagem da construção civil na cidade de São José dos Campos/SP**. São José dos Campos: Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, 2009.

DESCARREGA, A. **Quality improvement of the recycled aggregates through surfasse treatment**. Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals I Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2011.

FIGUEIREDO, F. F. **A gestão de resíduos sólidos em Natal/RN: entre o controle dos resíduos na cidade e o tratamento final no aterro sanitário**. Belém: IV Encontro Nacional da Anppas, 2012.

FILHO, R. P. et al. **Gestão de resíduos de construção civil e demolição no município de São Paulo e normas existentes**. Revista Técnica IPEP, São Paulo, SP, v.7. 55-72, jan/jun 2007.

FREITAS, C. **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

GOONAN, T. G. **Recycled Aggregates – Profitable Resource Conservation**: U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 2012, p. 181-199.

GUERRERO, J. J. E. **Comparativa del comportamiento del cortante de vigas de concreto con agregado normal, agregado reciclado y con adición de humo de sílice**. Universidad autónoma de Querétaro. Facultad de ingeniería. Santiago de Querétaro, 2012.

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

HAWLITSCHKE, G. et al. **Estudo da influência de areias recicladas a partir de resíduos de construção e demolição (RCD) em argamassas**. X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Fortaleza, 2013.

HEINECK, S., KAZMIERCZAK, C. S. **Argamassas de revestimento com incorporação de agregado miúdo de britagem de concreto**. X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Fortaleza, 2013.

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

JUNIOR, P. S. M. **Avaliação da absorção de água por imersão e da permeabilidade em argamassa reciclada**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Feira de Santana. Feira de Santana, 2011.

KARPINSKI, L. A. et al. **Gestão diferenciada de resíduos na construção civil: uma abordagem ambiental**. Edipucrs. Porto Alegre, 2009.

KATZ, A., BAUM, H. **A novel methodology to estimate the evolution of construction waste in construction sites**. Vol 31, Issue 2, February 2011, p. 353-358.

KOU, Shi-cong. et al. **Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates**. Construction and building materials. Estados Unidos, p. 881 – 889, 2012.

LASSO, P. R. O. et al. **Avaliação do uso de resíduos de construção e Demolição reciclados como corretivo da acidez do solo**. Tese (Doutorado). Centro de Energia Nuclear na Agricultura. São Paulo, 2013.

MARTÍNEZ, Iván et al. **A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars**. Construction And Building Materials. Cuba, p. 384-392. 20 set. 2013.

MARTINS, J. G.; ASSUNÇÃO, J. **Argamassas e Rebocos**. 3ª. ed. UFP, 2010.

MELO, F. C. A. C. **Análise de argamassas com substituição parcial do Cimento portland por cinza residual de lenha de Algaroba**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

MELO, M. C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinza de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

MIRANDA, L. M. C. C., **Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição de cal hidráulica e de cal hidratada**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real/Portugal, 2009.

MOREIRA, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo: 2010.

NENO, C. **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão – integração de RCD**. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Tecnico. Lisboa, 2010.

NETO, J. C. M. ; CÓRDOBA, R.E. . **Resíduos da Construção Civil em Municípios de Pequeno Porte: Estudo de Caso de Olímpia-SP**. In: XV SILUBESA Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2012, Belo Horizonte. Anais do XV SILUBESA, 2012.

OLIVEIRA, M. G. M. et al. **Melhoramento de solo com resíduos da construção civil reforçado com fibras de polipropileno**. Vitoria: Encontro Latino Americano de Edificações e Comunidades Sustentáveis. 2011.

PAIXÃO, S. O. **Estudo do uso de resíduo cerâmico de obras como agregado miúdo para a fabricação de argamassas para revestimento de alvenarias**. 2013. 74 fl. Monografia (Graduação). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

PAULA, P. R. F. **Utilização dos resíduos da construção civil na produção de blocos de argamassa sem função estrutural**. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco, Recife. 2010.

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

2008.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo a argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Universitária Pucrs, 2012. 188 p.

RESENDE, M. M. **Manutenção preventiva de revestimento de fachada de edifícios: limpeza de revestimentos cerâmicos**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2004.

SILVA, N. G. et al. **Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassas de cimento e areia**. Instituto Brasileiro de Concreto. Anais do 51º Congresso Brasileiro de Concreto. 14 p. 2009.

SILVA, N. G., CAMPITELI, V. C. **Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 21-35, out./dez. 2008.

SOARES, R. N. B. **Resíduo de construção e demolição e EPS reciclado como alternativa de agregados para a região amazônica - Aplicação em blocos para alvenaria**. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

TEGGUER, D. **Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach**. Construction and building materials. Estados Unidos, p. 112-116. 23 abr. 2012.

WERLE, A. P. et al. **Análise de Metodologias Utilizadas Para a Caracterização da Absorção de Água de Concreto Reciclado Como Agregado**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., Canela, 2010. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2010. v. 1, p. 1-11.

XIAO, Z. et al. **Use of wastes derived from earthquakes for the production of concrete masonry partition wall blocks**. Waste management. Estados Unidos, p. 1859 - 1866. 12 maio 2011.

YAZIGI, Walid. **A técnica de edificar**. 10. ed. rev. e atual. - São Paulo. Pini: SindusCon, 2009.