



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

**Cinthia Maia Pederneiras**

**AVALIAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS COM AGREGADOS  
RECICLADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO DE OBRAS DO MUNICÍPIO DE NATAL/RN**

**Natal - RN**

**2017**

**Cinthia Maia Pederneiras**

**AVALIAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS COM AGREGADOS  
RECICLADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO DE OBRAS DO MUNICÍPIO DE NATAL/RN**

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

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Durante Ingunza  
Co-orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim

Natal - RN

2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Pederneiras, Cinthia Maia.

Avaliação de blocos intertravados com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição de obras do município de Natal/RN / Cinthia Maia Pederneiras. - 2017.

118 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria del Pilar Durante Ingunza.

Coorientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim.

1. Resíduos de construção e demolição - Dissertação. 2. Agregados reciclados - Dissertação. 3. Blocos intertravados - Dissertação. I. Ingunza, Maria del Pilar Durante. II. Amorim, Enio Fernandes. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.4.036-027.33

CINTHIA MAIA PEDERNEIRAS

**AVALIAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS COM AGREGADOS  
RECICLADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO DE OBRAS DO MUNICÍPIO DE NATAL/RN**

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

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Del Pilar Durante Ingunza – Orientadora (UFRN)

---

Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim – Co-orientador (IFRN)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ada Cristina Scudelari – Examinadora Interna (UFRN)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juzélia Santos – Examinadora Externa à Instituição (IFMT)

**Natal, 17 de fevereiro de 2017**

# **AVALIAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS COM AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DE OBRAS DO MUNICÍPIO DE NATAL/RN**

**Cinthia Maia Pederneiras**

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Durante Ingunza  
Co-orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim

## **RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo analisar a utilização dos resíduos de construção e demolição de obras gerados no município de Natal/ RN como agregados reciclados para a fabricação de blocos de pavimentação intertravada. Na primeira etapa foi realizada a caracterização minuciosa dos agregados miúdos e graúdos. Os ensaios utilizados para este fim foram granulometria, massa unitária, massa específica, índice de forma, material pulverulento, material orgânico, absorção de água, inchamento, fluorescência de raio X (FRX), difratograma de raio X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A partir dos ensaios de caracterização de agregados naturais e reciclados pode-se estabelecer uma comparação das propriedades físicas, químicas e microscópicas. A fabricação dos blocos foi realizada com o traço em volume e substituição de 100% de agregados reciclados. As variáveis analisadas foram as condições dos agregados reciclados na mistura, investigando seu desempenho na condição seca, lavada e saturada. Os ensaios para analisar a viabilidade técnica dos blocos, conforme a norma específica NBR 9781 (2013), foram resistência à compressão (em idades de 7, 14, 28 e 270 dias) e absorção de água (aos 28 e 270 dias). Para avaliar o desgaste dos blocos foi construído um protótipo, o qual foi analisado após um ano de construção. Os blocos fabricados apenas com agregado miúdo reciclado apresentaram um incremento na resistência à compressão quando comparados aos blocos de referência. Já os blocos confeccionados com agregado

gráudo reciclado obtiveram as menores resistências. Observou-se também que quando os agregados reciclados são lavados apresentam melhor desempenho no produto final. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios para a aplicação dos blocos em ruas de baixo movimento e pouca carga. Com o intenso crescimento dos resíduos oriundos da construção civil, destaca-se a relevância desta pesquisa, a qual propõe a fabricação de um produto sustentável que visa minimizar o uso dos recursos naturais e promover uma destinação adequada para os resíduos gerados.

**Palavras-chave:** Resíduos de construção e demolição, agregado reciclado, blocos intertravados.

# **EVALUATION OF INTERCONNECTED BLOCKS WITH RECYCLED AGGREGATES FROM WASTE OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION OF NATAL / RN**

**Cinthia Maia Pederneiras**

Adviser: Prof. Dr<sup>a</sup>. Maria del Pilar Durante Ingunza  
Co-adviser: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim

## **ABSTRACT**

This work aims to analyze the use of construction and demolition waste in Natal / RN as recycled aggregates for precast concrete paving blocks. In the first stage, the detailed characterization of the aggregates (fine and coarse) was carried out. The tests used for this purpose were grading curves, bulk density, dry specific density, powdery material, organic material, water absorption, X-ray fluorescence (FRX), X-ray diffraction (XRD) and electron microscopy of Scanning (SEM). From the characterization tests of natural and recycled aggregates is possible to analyze physical, chemical and microscopic properties. Ten different mixes were analyzed with an effective water/cement ratio of 0.4 for recycled rates of coarse and fine aggregates of 100%. This research analyzed the conditions of the recycled aggregates in the mixture (dry, washed and saturated), evaluation of the performance of aggregates in a concrete mix. The tests to analyze the technical viability of the concrete blocks, according to the specific norm NBR 9781 (2013), were compressive strength (at ages of 7, 14, 28 and 270 days) and water absorption (at ages of 28 and 270 days). To evaluate the durability, a prototype was constructed, which was analyzed after one year of construction. The blocks made with only recycled sand showed an increase in the results of compressive strength when compared to the reference blocks. The

blocks made with recycled coarse obtained the smallest resistance. It was also observed that when the recycled aggregates are washed present a better performance in the final product. The results obtained were satisfactory for the application of the blocks in streets of low movement and low load. With the intense growth of waste from civil construction, the relevance of this research is proposes the manufacture of a sustainable product that aims to minimize the use of natural resources and promote a proper destination for the waste generated.

**Key-words:** Construction and demolition waste, recycled aggregate, interlocking concrete blocks.

## **AGRADECIMENTOS**

A CAPES pela bolsa concedida para a viabilidade da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, por toda transmissão de conhecimento e incentivo neste percurso.

Ao meu orientador Enio Amorim, que me confiou esta pesquisa e esteve ao meu lado nessa trajetória acadêmica. Muito obrigada pelos ensinamentos não apenas academicamente, mas pelos aprendizados para a vida pessoal e profissional. Agradeço pela paciência e parceria firmada.

A minha orientadora Maria Del Pilar, pela confiança depositada em mim.

A professora coordenadora do programa Ada Scudelari, por todo apoio ao longo dessa caminhada, por abrir portas para meu futuro acadêmico e por aceitar participar da banca para tecer contribuições a esta dissertação.

A empresa de pré-moldados Pavblocos, que me concedeu todo o aparato para a fabricação dos blocos.

A usina DUARTE, a qual forneceu o material reciclado utilizado nesta pesquisa.

A empresa Stellato Construtora pela disponibilização das dosagens para blocos de concreto.

Aos bolsistas, Áurea Serafim e Yago Victor, que participaram e colaboraram com o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de construção da UFRN, Sandro Ricardo e “seu Chico”, e os seus bolsistas, por serem sempre solícitos e atenciosos na realização dos ensaios.

Aos meus amigos, Danyel Paiva, Lucy Kheyler, Ruan Landolfo e Thiago Fonseca, pela amizade e colaboração nas disciplinas e nas pesquisas laboratoriais.

A minha família e amigos, por todo amor e suporte incondicional. Muito obrigada por estarem sempre ao meu lado.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

## SUMÁRIO

Lista de figuras

Lista de tabelas

Lista de siglas e abreviações

### CAPÍTULO 1

1	Introdução.....	15
1.1	Justificativa da escolha do tema.....	18
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Objetivo geral.....	19
1.2.2	Objetivos específicos.....	19
1.3	Estrutura da dissertação.....	19

### CAPÍTULO 2

2	Fundamentação Teórica.....	21
2.1	Resíduo de Construção e Demolição.....	21
2.1.1	Definição.....	21
2.1.2	Produção e Gerenciamento de RCD.....	21
2.1.3	Aplicabilidade do RCD.....	25
2.1.4	Pesquisas sobre aplicação do RCD.....	31
2.2	Pavimentação Intertravada.....	36
2.2.1	Definição.....	36
2.2.2	Processo Construtivo.....	38
2.2.3	Reaproveitamento de RCD em blocos intertravados.....	42

### CAPÍTULO 3

3	Materiais e Métodos.....	46
3.1	Materiais.....	46
3.1.1	Cimento.....	46
3.1.2	Agregado miúdo.....	47
3.1.3	Agregado graúdo.....	48
3.1.4	Aditivo.....	49
3.1.5	Água.....	49
3.2	Caracterização do RCD.....	49
3.3	Dosagem.....	53

3.4	Fluxograma dos procedimentos realizados.....	58
3.5	Processo de fabricação dos blocos intertravados.....	60
3.6	Execução de um trecho experimental (Protótipo).....	64
CAPÍTULO 4		
4	Resultados e discussões.....	66
4.1	Caracterização dos agregados.....	66
4.1.1	Caracterização física.....	66
4.1.1.1	Análise granulométrica.....	75
4.1.2	Caracterização química.....	77
4.1.3	Caracterização mineralógica.....	80
4.1.4	Caracterização microscópica.....	82
4.2	Corpos de prova na dosagem experimental.....	86
4.2.1	Resistência mecânica.....	86
4.3	Blocos intertravados de concreto.....	87
4.3.1	Estado fresco.....	87
4.3.2	Absorção de água.....	88
4.3.3	Resistência à compressão.....	91
4.3.4	DRX dos blocos intertravados.....	96
4.3.5	Protótipo dos blocos intertravados.....	97
4.3.6	Análise econômica dos blocos intertravados.....	101
CAPÍTULO 5		
5	Considerações Finais.....	103
5.1	Conclusões.....	103
5.2	Sugestões para estudos futuros.....	104
	Referências Bibliográficas.....	105

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1.1 – Erosão de talude provocado por descarte irregular de RCD em São Paulo.....	16
-----------------------------------------------------------------------------------------	----

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Argamassa aderida a um grão após submetido ao processo de britagem de concreto.....	27
Figura 2.2 – Seção típica de um pavimento intertravado.....	37
Figura 2.3 – Tipos básicos de formatos de blocos.....	40

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Agregados miúdos: (a) Natural; (b) Reciclado.....	48
Figura 3.2 – Agregados graúdos: (a) Natural; (b) Reciclado.....	48
Figura 3.3 – (a) Pilhas de estoque de material na usina; (b) Produção diária dos agregados reciclados.....	50
Figura 3.4 – Quarteamento: (a) Agregado reciclado miúdo; (b) Agregado reciclado graúdo.....	50
Figura 3.5 – Amostras dos agregados reciclados utilizadas nos ensaios de FRX, DRX e MEV: (a) AR misto; (b) AR cinza; (c) AR vermelho.....	51
Figura 3.6 – Ensaios dos agregados: (a) Massa específica da areia reciclada; (b) Massa unitária do agregado reciclado graúdo.....	52
Figura 3.7 – Dosagens dos blocos intertravados.....	54
Figura 3.8 – Ensaio de resistência à compressão: (a) Equipamento com as duas placas acopladas; (b) Blocos rompidos com material reciclado e natural....	57
Figura 3.9 – Ensaios de absorção de água: (a) imersão segundo a NBR 9781; (b) blocos fervendo de acordo com NBR 9778.....	57
Figura 3.10 – Ensaios de absorção de água: (a) pesagem na balança hidrostática; (b) pesagem do bloco saturado.....	58
Figura 3.11 – (a) Resíduos produzido em obra; (b) Pesagem do material na usina.....	60
Figura 3.12 – (a) Primeira triagem realizada na usina; (b) Espalhamento do material para a segunda triagem.....	60
Figura 3.13 – (a) RCD depositado no britador; (b) Terceira triagem na esteira....	61

Figura 3.14 – (a) Agregado reciclado produzido conforme a peneiração acoplada ao britador; (b) Pilhas de estoque de material na usina.....	61
Figura 3.15 – (a) Material reciclado sendo descarregado na fábrica de pré-moldados; (b) Máquina de vibro-prensa utilizada para fabricar os blocos.....	62
Figura 3.16 – (a) Composição granulométrica sendo colocada na vibro-prensa ; (b) Detalhes dos moldes empregados para os blocos excutados.....	62
Figura 3.17 – (a) Blocos sendo produzidos na fábrica de pré-moldados; (b) Acondicionamento dos blocos em câmara úmida.....	63
Figura 3.18 – (a) Paletização dos blocos confeccionados; (b) Pintura dos blocos para diferenciar as dosagens na construção do protótipo.....	64
Figura 3.19 – (a) Protótipo construído na usina de reciclagem com os blocos confeccionados na fábrica de pré-moldados; (b) As seções dos blocos pintados foram separadas conforme as misturas.....	65
<b>CAPÍTULO 4</b>	
Figura 4.1 – Gráfico da distribuição granulométrica dos agregados miúdos.....	75
Figura 4.2 – Gráfico da distribuição granulométrica dos agregados graúdos.....	76
Figura 4.3 – Difrátograma de raio X do agregado reciclado.....	81
Figura 4.4 – Forma e textura superficial da areia natural.....	82
Figura 4.5. – Forma e textura superficial da areia reciclada mista.....	83
Figura 4.6 – Forma e textura superficial da areia reciclada da fração cinza.....	83
Figura 4.7 – Forma e textura superficial da areia reciclada da fração vermelha...	83
Figura 4.8 – Gráfico da resistência à compressão simples dos corpos de prova..	86
Figura 4.9 – Absorção dos blocos aos 28 e 270 dias.....	89
Figura 4.10 – Resistência à compressão aos 7, 14, 28 e 270 dias.....	91
Figura 4.11 – Evolução da resistência à compressão desde 7 aos 28 dias.....	94
Figura 4.12 – Resistência à compressão aos 28 dias.....	95
Figura 4.13 – DRX dos blocos aos 28 dias.....	97
Figura 4.14 – Protótipo construído na Usina, após um ano de uso.....	98
Figura 4.15 – Blocos produzidos com agregados naturais.....	99
Figura 4.16 – Blocos produzidos com agregados reciclados secos.....	99
Figura 4.17 – Blocos produzidos com areia natural e brita reciclada saturada.....	99
Figura 4.18 – Blocos produzidos com areia natural e brita reciclada lavada.....	100
Figura 4.19 – Blocos produzidos com areia natural e brita reciclada seca.....	100

Figura 4.20 – Blocos produzidos com agregados reciclados lavados.....	100
Figura 4.21 – Blocos produzidos com areia reciclada lavada e brita natural.....	101

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Composição física e mecânica do cimento Portland CP II-Z-RS.....	46
Tabela 3.2 – Composição química do cimento Portland CP II-Z-RS.....	47
Tabela 3.3 – Propriedades físicas do cimento Portland CP II-Z-RS.....	47
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas do cimento Portland CP II-Z-RS.....	47
Tabela 3.5 – Ensaio normatizados da caracterização do agregado miúdo.....	51
Tabela 3.6 – Ensaio normatizados da caracterização do agregado graúdo.....	52
Tabela 3.7 – Descrição dos traços utilizados.....	56

### CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Composição dos agregados reciclados utilizados.....	66
Tabela 4.2 – Composição dos agregados reciclados em outras pesquisas.....	68
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios físicos do agregado miúdo.....	69
Tabela 4.4 – Pesquisas com valores de massas específicas em agregados miúdos.....	70
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios físicos do agregado graúdo.....	73
Tabela 4.6 – Coeficientes de uniformidade do agregado miúdo.....	77
Tabela 4.7 – FRX dos materiais utilizados na pesquisa.....	78
Tabela 4.8 – Comparação dos resultados de FRX do agregado reciclado de pesquisas anteriores.....	79
Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de absorção de água pela NBR 9778.....	90

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AR – Areia Reciclada

AN – Areia Natural

AR/BR sec – Areia Reciclada e Brita Reciclada na condição seca

AR/BR lav – Areia Reciclada e Brita Reciclada na condição lavada

AR/BN sec – Areia Reciclada na condição seca e Brita Natural

AR/BN lav – Areia Reciclada na condição lavada e Brita Natural

AR/BN sat – Areia Reciclada na condição saturada e Brita Natural

AN/BR sec – Areia Natural e Brita Reciclada na condição seca

AN/BR lav – Areia Natural e Brita Reciclada na condição lavada

AN/BR sat – Areia Natural e Brita Reciclada na condição saturada

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

REF (AN/BN) – Referência (Areia Natural e Brita Natural)

## CAPÍTULO 1

# Introdução

A indústria da construção civil se mostra fundamental para o desenvolvimento sócio-econômico de um país, abarcando as construções de habitações, infraestrutura e outras obras. Este setor é imprescindível para atender as demandas sociais, proporcionando moradias e implementando os serviços urbanos primordiais como a geração de energia, saneamento básico, meios de telecomunicações e transporte. Desse modo, o setor da construção civil promove o incremento da qualidade de vida dos cidadãos e o estímulo do mercado a produzir riquezas, movimentando a economia.

De acordo com dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil (CBIC) o setor da construção civil representou cerca de 6,6% de todo o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro em 2014. A indústria da construção civil emprega aproximadamente 7,3% de toda a mão-de-obra no país, o que corresponde a 2,8 milhões de trabalhadores. Estes valores são bastante significativos para a economia, elencando a construção civil como um dos ramos com maior capacidade de elevar a taxa de crescimento do produto, do emprego e da renda em curto e médio prazo.

Não obstante a relevância econômica, a construção civil pode afetar negativamente o meio ambiente. Esta indústria apresenta uma extensa cadeia produtiva: extração de matérias-primas, confecção e transporte de materiais, elaboração de projetos, execução, manutenção e demolição. Em cada etapa deste ciclo, muitos impactos ao meio ambiente são gerados, desde seu alto consumo de energia, a demasiada exploração de recursos naturais e a elevada geração de resíduos.

John (1999) estimou que a indústria da construção civil consome em torno de 20 a 50% dos recursos naturais extraídos do planeta. Além disso, a geração de

resíduos de construção e demolição de obras (RCD) varia entre 40 a 70% da quantidade total de resíduos sólidos urbanos gerados no país, de acordo com Pinto (1999).

A elevada quantidade de resíduo torna-se mal gerenciada, ocorrendo o descarte inadequado no meio ambiente. Assim, provoca um desequilíbrio ambiental, o que degrada a qualidade de vida urbana e sobrecarrega os serviços municipais de limpeza pública (SCHNEIDER, 2003). O descarte irregular de RCD acarreta danos ao desenvolvimento sustentável, implica em problemas ambientais, sociais e econômicos.

As principais consequências desta disposição inadequada são a poluição dos mananciais, assoreamento de rios e córregos, contaminação do solo, deslizamentos (Figura 1.1), obstrução de sistemas de drenagem, inundações, entre outros problemas.

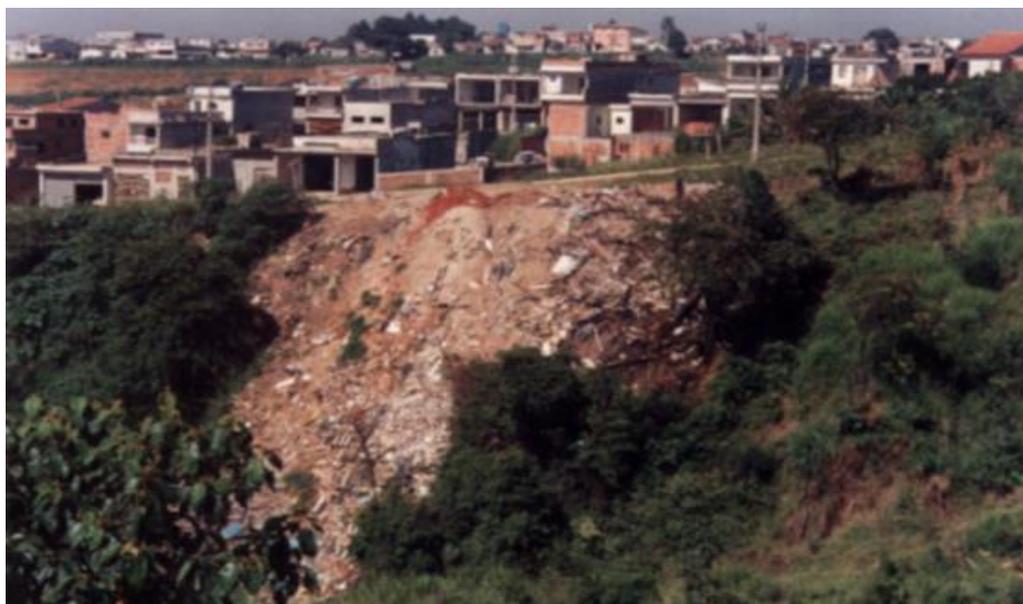


Figura 1.1 – Erosão de talude provocado por descarte irregular de RCD em São Paulo.

Fonte: Schneider, 2003.

Evidencia-se no cenário atual um elevado crescimento da população no meio urbano, não agregando de forma proporcional as devidas demandas de infraestruturas para garantir a qualidade de vida e o bem-estar dos cidadãos. O grande volume de resíduos gerados torna-se uma dificuldade para o manejo e a gestão da destinação correta desses materiais. Este fator é atribuído ao rápido adensamento das cidades

junto com a urbanização acelerada. Embora tenha ocorrido um relativo avanço nos últimos vinte anos, a maioria desses resíduos de construção e demolição produzidos no contexto atual não é destinada de forma apropriada.

Goldemberg *et al.* (2011) aponta as consequências de um rápido crescimento da população mundial sobre os recursos naturais finitos e correlaciona a sustentabilidade com aspectos ambientais, econômicos e sociais, com o intuito de não desacelerar a economia, acatar os anseios da sociedade e preservar o meio ambiente. Busca-se prezar o equilíbrio entre proteção ambiental, justiça social e viabilidade econômica.

Esta nova visão ambiental demanda medidas significativas para a construção civil, a fim de reduzir o consumo de energia e de materiais, e minimizar as emissões de carbono (TORRALBA; JALALI, 2010). O setor é considerado um dos maiores consumidores de recursos naturais como também é responsável pela geração de um volume expressivo de resíduos sólidos. Em prol de um melhor desempenho sustentável, a indústria se torna responsável pela diminuição dos impactos gerados e otimização dos processos construtivos.

As técnicas de reaproveitamento de RCD são alternativas que contribuem para o desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil, pois fornece uma destinação adequada aos resíduos e, implica numa redução de extração e consumo de matérias-primas. Este destino final adequado para os resíduos tende a aumentar a vida útil dos aterros sanitários e evita danos aos recursos hídricos e aos solos. Além disso, minimiza a poluição, eliminando os resíduos; reduz o consumo de energia e ameniza os impactos gerados pelo aquecimento global (BEHERA *et al.*, 2014).

As aplicações de RCD como agregados reciclados são as mais variadas, e já possuem estudos com sua incorporação em diversos materiais e processos construtivos. Baseado nestes aspectos, este trabalho apresenta uma proposta de aplicação de resíduos de construção e demolição de obras como agregados reciclados na fabricação de blocos de concreto de pavimentação intertravada, como uma alternativa para o aproveitamento destes materiais. Na composição do concreto a fração dos agregados representa cerca de 80% da mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2008), e, com isso, evidencia-se a relevância desta substituição de agregados naturais pelos reciclados.

Os agregados reciclados miúdos e graúdos de substituição foram provenientes de uma usina de reciclagem localizada próxima ao município de Natal/RN. A fim de identificar a composição do material trabalhado foi realizada uma triagem manual para a segregação do tipo de constituinte (concreto, argamassa, cerâmica, piso, gesso), com o intuito de comparar suas propriedades, já que os resíduos em uso são considerados mistos.

Os blocos foram avaliados de acordo com a norma NBR 9781 (2013), onde as propriedades de resistência mecânica e absorção de água foram testadas. As condições dos agregados reciclados foram as variáveis para a análise do produto final.

## **1.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA**

O alto consumo de agregados para a produção de concreto e a elevada quantidade de resíduos gerados implica em impactos ambientais, que necessitam ser minimizados por medidas alternativas que viabilizem o desenvolvimento sustentável na indústria da construção civil. De acordo com a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (2010) a produção anual de agregados no país é de aproximadamente 632 milhões de toneladas, contribuindo com o passivo ambiental negativo, por explorar indiscriminadamente as jazidas de recursos naturais.

De acordo com a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) a estimativa de geração de resíduos no ano de 2015 é de 84.180.696m<sup>3</sup>. A produção de agregados reciclados das usinas de todo o país é uma média de 5.178.000m<sup>3</sup> por ano. Na usina, onde o material para esta pesquisa foi retirado, a produção de agregados reciclados no ano de 2015 foi de 48.660m<sup>3</sup>. Para encontrar soluções adequadas para a aplicação deste material torna-se necessário dar visibilidade para a problemática, de modo a sensibilizar e mobilizar o governo e a sociedade para buscar práticas mais sustentáveis na construção civil.

A aplicação do RCD, viabilizando uma destinação mais apropriada, na confecção dos blocos intertravados com substituição dos agregados naturais por agregados reciclados, minimiza os impactos ao meio ambiente causados pela disposição inadequada dos resíduos, aliviando o problema de acondicionamento, o

que sobrecarrega os aterros. Este tipo de pavimentação busca soluções em vias de tráfego leve. A fabricação destes blocos contribui também para a redução de extração de outros recursos naturais para a construção de novos pavimentos.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Esta pesquisa objetiva analisar a influência dos agregados reciclados miúdos e graúdos provenientes dos resíduos da construção e demolição nas propriedades mecânicas e físicas dos blocos de concreto para pavimento intertravado, levando em conta as condições do agregado reciclado na mistura.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar as propriedades físicas, químicas e microscópicas dos agregados reciclados de RCD;
- Avaliar a influência do tipo de agregado reciclado (miúdo ou graúdo) nos resultados de propriedades e desempenho mecânico do produto final;
- Analisar alterações nos aspectos visuais dos blocos;
- Avaliar a resistência a compressão, a absorção de água e o desgaste dos blocos intertravados com agregados reciclados.

## **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

*Capítulo 1:* apresenta uma breve introdução sobre a problemática envolvendo a produção de resíduos de construção e demolição de obras, a justificativa da pesquisa e os objetivos gerais e específicos.

*Capítulo 2:* apresenta uma revisão bibliográfica sobre os resíduos da construção civil e demolição, sua produção, gestão e aplicações. Na revisão da literatura também é abordado o conceito e processo construtivo da pavimentação

intertravada. Por fim, algumas aplicações de RCD em blocos de concreto em pesquisas anteriores.

*Capítulo 3:* apresenta o programa experimental adotado para a pesquisa, os materiais utilizados, os ensaios realizados na caracterização, a definição dos traços analisados a partir de uma dosagem experimental e apresenta o processo de fabricação dos blocos e os métodos de ensaios realizados.

*Capítulo 4:* apresenta os resultados obtidos na pesquisa e a análise dos mesmos, correlacionando-os com outras pesquisas semelhantes já realizadas;

*Capítulo 5:* apresenta as conclusões da pesquisa e sugere temas para pesquisas futuras

## CAPÍTULO 2

# Fundamentação Teórica

## 2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

### 2.1.1 Definição

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 (2002):

os resíduos de construção e demolição são aqueles provenientes de atividades de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (CONAMA nº 307, 2002, p. 1).

A Resolução também especifica que resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados de resíduos sólidos da construção civil são classificados como classe “A”. Segundo a ABNT NBR 15116 (2004) o agregado reciclado é definido 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”.

### 2.1.2 Produção e gerenciamento de RCD

Jonh e Agopyan (2000) apontam razões para a elevada geração de resíduos na construção civil como os possíveis vícios de execução com procedimentos arcaicos, reformas ou modernização de edificações, descarte de componentes que atingiram o limite de vida útil e correções necessárias em obras.

A indústria da construção civil para promover o desenvolvimento sustentável deve adotar medidas como a redução de desperdícios, aumento da qualidade dos produtos, maior durabilidade dos empreendimentos, ações previstas na fase de projeto, análise do ciclo da cadeia produtiva de materiais e resíduos, controlando suas emissões prejudiciais ao ambiente, e reciclagem dos resíduos (ANGULO, 2000).

Neste cenário, a destinação inadequada do RCD acarreta prejuízos ao meio ambiente e à saúde pública. Desse modo, torna-se iminente o desenvolvimento de métodos para reutilização do entulho proveniente da construção civil a fim de mitigar os impactos derivados destes resíduos.

De acordo com Schneider (2003) os Estados Unidos da América reciclam 25% do total dos resíduos gerados e o reaproveitamento do RCD na Europa corresponde a 28% do total gerado. A Holanda possui os maiores índices de reciclagem de entulho, totalizando cerca de 90% do volume gerado pela construção civil que é reciclado, o que corresponde em torno de 16,5 milhões de toneladas por ano. Estes dados evidenciam que sistemas de gerenciamento ambiental podem contribuir para diminuir a geração de RCD.

Silva (2014) destaca que em alguns países o uso de agregados reciclados é limitado apenas a execução de concretos com resistência de até 25 MPa e uso para pavimentação. A Comunidade Europeia elenca países como Finlândia, Áustria, Suécia e Inglaterra que reciclam quase metade do RCD gerado. Outros países como Bélgica e Dinamarca atingem índices de reciclagem de 80% do resíduo produzido.

Uma política de incentivo a reciclagem como a imposição de taxas sobre todo o material destinado ao aterro e benefícios para as usinas de britagem são medidas adotadas em países desenvolvidos para reduzir a produção total de RCD e promover a reciclagem do entulho.

A partir da elevação da taxa para a disposição de RCD em aterros, a Dinamarca incrementou significativamente a reciclagem, antes o total de RCD reciclado era de 25%, após dez anos da implantação da taxa, a reciclagem do RCD passou para 90% de todo o resíduo gerado (SCHNEIDER, 2003). A maioria dos resíduos reciclados é incorporada pela construção civil, como material de camada de base e sub-base de rodovias e material de aterro.

Outro instrumento que pode ser adotado pelas políticas públicas é a regulamentação de triagens dos RCD no local de sua geração e a posterior entrega obrigatória de RCD em unidades de reciclagem, esta medida facilita e otimiza o seu reaproveitamento. Silva (2014) aponta que no ano de 2000 as normas holandesas permitiram a utilização de agregados reciclados em concreto protendido. Com esse avanço a Holanda se destaca como um dos países com maiores índices de reciclagem do entulho gerado.

Atualmente, a legislação brasileira exige o plano de gestão dos resíduos sólidos, no qual descreve a destinação de cada um dos materiais resultantes. Entretanto, não há políticas que estimulem a reciclagem, para isso é necessário que o agregado reciclado apresente padrões de desempenho compatíveis com o seu uso, e ofereça uma maior compatibilidade do insumo. Evidencia-se um alto potencial de reciclagem no RCD, o que pode ser absorvido pela própria indústria da construção civil.

Karpinsk *et al.* (2009) apontam que para se atingir um desenvolvimento sustentável é necessário adotar a aplicação de tecnologias apropriadas e ecologicamente corretas que reduzam o desperdício, a geração de resíduos e o uso de recursos naturais. Para isto, é imprescindível que ocorra uma mudança cultural, acompanhada de uma educação ambiental para se obter uma visão sistêmica da cadeia produtiva da indústria da construção civil.

Assim, Karpinsk *et al.* (2009) descreve o desenvolvimento sustentável como um processo que acarreta modificações na forma de explorar os recursos naturais, direcionando investimentos e alterações institucionais para um ciclo de construção que amenize a geração de impactos ambientais, visando o equilíbrio das aspirações e necessidades humanas presentes e futuras.

No Brasil, os resíduos gerados pelo setor da construção civil não tinham regulamentação por políticas públicas até 2002. O Conselho Nacional de Meio Ambiente decretou a Resolução nº 307, estabelecendo critérios, diretrizes e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

A legislação visa promover benefícios nos aspectos ambientais, econômicos e sociais; e institui a cadeia de responsabilidade, na qual se tornam agentes responsáveis os geradores de RCD, os transportadores e os municípios. A Resolução

nº 307 do CONAMA atribui ao gestor municipal a obrigação de controlar, regulamentar e fiscalizar a gestão de resíduos. Prevê, ainda, a necessidade de aprovação, perante os órgãos públicos, de um Projeto de Gerenciamento de Resíduos.

Um novo sistema de gestão foi introduzido pela Resolução, que encarrega os geradores a reduzir, reutilizar e reciclar, tratar e dispor os resíduos de construção e demolição (RCD). Karpinsk *et al.* (2009) descrevem que os geradores são todos aqueles responsáveis tanto no processo de novas construções, nas reformas, reparos e demolições de estruturas e rodovias, quanto na remoção de vegetação e escavação de solos, classificando os geradores de resíduos em "grandes geradores" (construtoras) e "pequenos geradores" (particulares).

Os autores afirmam que a principal orientação desta resolução é disciplinar o setor da construção civil fomentando a não-geração de resíduos e exigindo a segregação do RCD a fim de racionalizar o reaproveitamento destes.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), através da Lei nº 12.305 de 2010 foi aprovada para subsidiar a Resolução nº 307 do CONAMA. A lei estabelece diretrizes de como o país deve gerenciar os seus resíduos, incentivando a reciclagem e a sustentabilidade. Brasileiro (2013) aponta que esta lei se baseia no princípio da responsabilidade compartilhada, interligando os âmbitos ambientais, sociais e econômicos e tornando todos os agentes envolvidos na fabricação, distribuição, venda e consumo, responsáveis pela geração dos resíduos.

Em 2011 surge a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) pela necessidade das empresas recicladoras de entulho para fortalecer o setor. Com o objetivo de aperfeiçoar projetos, leis e programas visando reutilizar e reciclar o RCD gerado, uma forma de evidenciar alternativas sustentáveis.

A Resolução nº 307 do CONAMA recebeu adequações importantes. Em 2012, para alinhar suas deliberações à Política Nacional de Resíduos Sólidos foi publicada a Resolução nº 448. Esta atualização enfatiza o gerenciamento dos resíduos como um conjunto de ações exercidas nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada de acordo com o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com o plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na Lei nº 12.305.

Considera-se a gestão integrada como ações voltadas para busca de soluções para os resíduos, envolvendo dimensões políticas, ambientais, econômicas, culturais e sociais. De forma a enfatizar o desenvolvimento sustentável na indústria da construção civil.

Para Pinto (1999) o gerenciamento de RCD no Brasil necessita de mais incentivos do poder público, pois esta gestão se limita pela limpeza das áreas ilegais de deposição final. A falta de políticas públicas é evidente nessa problemática, e restringe-se a aplicação de penalidades para destinos finais irregulares na malha urbana voltada para o gerador responsável do resíduo.

Os efeitos da deposição final inadequada são destacados pelo autor como o assoreamento de canais, entupimento de galerias, degradação da área urbana e proliferação de insetos, acarretando prejuízos tanto para o meio ambiente quanto para a saúde coletiva.

Torna-se necessário gerenciar o RCD por meio de regulamentações, a fim de evitar as deposições irregulares no meio ambiente, assim também como estabelecer critérios para segregar os resíduos com objetivo de aumentar e estimular a reciclagem por meio de especificações, decretos e normas técnicas que promovam as utilizações dos materiais reciclados.

### **2.1.3 Aplicabilidade do RCD**

As pesquisas relacionadas ao reaproveitamento do RCD em processos construtivos e materiais da construção começaram após a Segunda Guerra Mundial (JOHN; AGOPYAN, 2000). Para a reconstrução das cidades europeias desenvolveu-se técnicas que incorporavam os resíduos nas misturas de concreto para as edificações, visando promover uma solução final aos entulhos gerados.

Pode-se observar relativo avanço nos países desenvolvidos, nos quais possuem legislações rigorosas, instrumentos regulatórios, aumento tanto da taxação da destinação do entulho para o aterro quanto da extração de matéria-prima nas jazidas, entre outros incentivos governamentais que promovem o desenvolvimento sustentável.

A utilização de RCD como agregado reciclado vem sendo pesquisado para as mais variadas aplicações. A tendência do desenvolvimento sustentável está cada vez mais comum. O uso de resíduos de construção e demolição, da indústria da cerâmica e de pneus na forma de agregados miúdos e graúdos para diversos produtos de cimento está presente na construção civil. Uma alternativa sustentável (do ponto de vista econômico, social e ambiental), correta e interessante para os três vértices da sociedade: população, poder público e empresa privada.

Baseado nesse conceito sustentável, muitas tecnologias estão sendo desenvolvidas para atender esta demanda ambiental. As técnicas de reaproveitamento de RCD em pavimentação é a forma mais simples de reciclagem, utilizando uma grande quantidade de resíduos em misturas com solo, em base, sub-bases e revestimentos primários. Já a incorporação destes resíduos em misturas de concreto se limita às porcentagens de substituições.

As limitações dos agregados reciclados são apontadas como altos teores de argamassa aderida aos grãos, excesso de materiais contaminantes e elevado teor de material pulverulento. As principais diferenças do agregado reciclado em relação ao agregado natural são a heterogeneidade na composição, a menor resistência mecânica dos grãos e maior absorção de água.

A quantidade de argamassa ou pasta de cimento aderida aos grãos relaciona-se com o tipo de material do RCD e o tipo de britagem submetida. Como pode ser visto na Figura 2.1 este fator interfere nas características do agregado reciclado, por aumentar a área superficial das partículas (HAWLITSCHEK, 2014). Para Pepe *et al.* (2014) os agregados reciclados apresentam uma porcentagem significativa de poros e microfissuras devido a porosidade da pasta de argamassa velha ligada aos agregados naturais antigos.

O alto teor de argamassa antiga aderida aos grãos é visto como prejudicial para o agregado reciclado, influenciando negativamente as propriedades físicas, mecânicas e químicas (JUAN; GUTIÉRREZ, 2009). Conforme Bazuco (1999) os agregados reciclados possuem um teor de argamassa aderida em torno de 41% do seu volume. Para Etxeberria *et al.* (2006) a quantidade de argamassa aderida aos grãos é superior a 50%, e isto está relacionado a um pior desempenho dos concretos produzidos com agregados reciclados.



Figura 2.1 – Argamassa aderida a um grão após submetido ao processo de britagem de concreto.

Fonte: Ulsen (2011).

A argamassa aderida correlaciona diretamente com a absorção de água dos agregados reciclados. Quanto maior o teor de pasta aderida, maior a taxa de absorção do agregado (ANGULO, 2000). Este fator interfere na trabalhabilidade da mistura, nas propriedades mecânicas e na durabilidade (ULSEN, 2011). Outra propriedade afetada pela argamassa aderida é a porosidade.

Os agregados reciclados apresentam maior porosidade e microfissuras devido a pasta antiga aderida aos grãos. De acordo com Hansen (1997) isto implica também numa redução da massa específica do agregado reciclado em relação ao agregado convencional. É oportuno destacar que nessas situações a resistência ao desgaste por abrasão torna-se menor (TAVAKOLI, SOROUSHIAN, 1996; JADOVSKI, 2005).

Assim, um dos principais problemas na utilização dos agregados reciclados é a dificuldade de quantificação da pasta de cimento oriundo de construções antigas que estão aderidas à superfície das partículas, aumentando assim a área superficial do grão como também a porosidade do material.

Kahn *et al.* (2014) elaboraram uma metodologia microestrutural para caracterizar e quantificar o teor de argamassa aderida. Além da microscopia eletrônica de varredura, os autores utilizaram análises químicas e composições mineralógicas dos materiais. Entretanto, alguns fatores tornam este procedimento limitado; trata-se de uma ferramenta de alta complexidade, custo elevado e com exigências técnicas para sua operação.

A diversidade da composição dos agregados reciclados é outra limitação para seu uso. A composição e a qualidade dos agregados reciclados dependem das diversas fontes e dos diferentes processos construtivos, acarretando uma vasta variabilidade das características. Em razão da pluralidade da origem dos resíduos, estes são caracterizados como materiais heterogêneos, o que implica numa desvantagem para seu uso.

Dhir *et al.* (2015) apontam a importância da demolição seletiva como a forma mais eficaz de minimizar a quantidade de contaminantes em materiais de RCD. A técnica é caracterizada pela retirada de certos materiais ou reaproveitamento de outros. Esta abordagem constitui em realizar a triagem na origem, nos próprios canteiros de obras. Para isso, as usinas de reciclagem impõem rigorosos controles de entrada.

Dessa forma, a conscientização das empresas para uma educação ambiental representa o descarte prévio dos materiais indesejáveis como plásticos, vidros, gesso e madeira, melhorando a qualidade do agregado reciclado. Embora todo esse rigor de procedimento seja mais eficiente, não é a forma mais comum para a destinação dos resíduos. O processo de triagem começa na usina de reciclagem, e assim, os resíduos são encaminhados para a etapa de britagem.

No Brasil, as usinas de reciclagem possuem limitações, uma vez que não há equipamentos para a separação dos resíduos como tanque de flutuação ou separadores por injeção de ar (ANGULO, 2000). Outra limitação é a adequação das normas para o uso de agregados reciclados de RCD em concreto, devido a elevada heterogeneidade da composição, variabilidade das propriedades dos agregados e a falta de controle das operações de processamento, a triagem visual não garante a uniformidade e qualidade do produto final.

O RCD é considerado bastante heterogêneo, tendo em vista que em sua composição pode-se identificar restos de concreto, argamassa, cerâmica, aço, plástico, madeira, entre outros componentes, em diferentes proporções de cada, variando conforme o material reciclado (Leite *et al.*, 2011).

As técnicas de aplicação do RCD variam de acordo com sua constituição (JOHN; AGOPYAN, 2000). A predominância da fração cerâmica pode ser beneficiada

em forma de agregados mais porosos e de menor resistência, provocando uma redução na resistência dos grãos e um aumento na absorção de água.

As frações compostas em sua totalidade de restos de concretos e rochas podem ser recicladas como agregados para a produção de materiais cimentícios. Assim, os agregados mistos possuem aplicações limitadas à concretos de menor resistência como camadas drenantes, contra-pisos, blocos de concretos, entre outras aplicações não estruturais.

As características de composição do RCD permeiam parâmetros específicos de região e da variação ao longo do tempo. As atividades em cada etapa da obra produzem entulhos diferentes, nos quais determinados componentes predominam e interfere na composição do resíduo. Em razão dos diversos processos construtivos e da preferência de certos materiais, os resíduos de cada país possuem produtos que se sobressaem na composição.

De acordo com Silva (2014) cabe ainda ressaltar a importância de classificar a fonte geradora do entulho (construção, demolição, reforma ou desastres naturais) como também o porte da obra e sua tipologia de construção (industrial, residencial, comercial etc.). Assim, a caracterização da composição do RCD está condicionada a regionalidade, fase da obra e da estrutura de seus constituintes. O RCD por ser caracterizado pelos diversos tipos de materiais forma uma combinação heterógena, isto implica na dificuldade de obtenção de um modelo representativo padrão.

Para uniformizar e difundir o uso deste material alternativo é necessário realizar um controle tecnológico rígido, no qual selecione previamente as frações de cada material que visem potencializar seu reaproveitamento dependendo da aplicação adotada. Amorim (2013) destaca que para auferir a qualidade do RCD é necessário enquadrar os resíduos em determinados parâmetros físicos, químicos e mecânicos para que estes possam atender as soluções de engenharia proposta.

As propriedades físicas dos agregados como volume, tamanho, distribuição dos poros, porosidade, forma e textura dos grãos afetam as propriedades do concreto como também sua composição química e mineralógica influencia no produto final (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Técnicas de beneficiamento dos agregados reciclados podem ser utilizadas a fim de homogeneizar o material e promover uma melhor aplicabilidade do mesmo. Pepe *et al.* (2014) ressalta a limpeza autógena dos grãos a fim de eliminar a argamassa antiga aderida nos grãos, sem fragmentar a partícula. Este processo consiste em um moinho com rotação e assim, através do atrito, esta camada antiga é removida. Tal procedimento reduz a heterogeneidade do agregado reciclado, porém é pouco disseminado.

As implicações negativas para o uso de agregados reciclados baseiam-se na maior porosidade, textura mais rugosa, formato angular e maior quantidade de finos (BEHERA *et al.* 2014). Estas propriedades requerem maior quantidade de água de amassamento, o que prejudica a trabalhabilidade, no estado fresco, e o desempenho mecânico, no estado endurecido. Leite *et al.* 2011 afirmam que os agregados reciclados possuem uma textura superficial áspera, com baixa massa específica e alta absorção de água em comparação aos agregados naturais.

A baixa densidade das partículas do agregado reciclado aumenta a capacidade de absorção e reduz sua resistência, de modo que isto requer uma maior quantidade de água e cimento para a mistura, o que dificulta atingir os requisitos mínimos especificados em normas (Morales *et al.* 2011). Esta diminuição de densidade das partículas dos agregados reciclados pode ser explicada pela elevada quantidade de argamassa aderida aos grãos, o que implica também no aumento de absorção de água, de acordo com os estudos de Poon e Chan (2006).

Apesar, de tais adversidades o uso de agregado reciclado de RCD tem vastas aplicações, em especial, operações de pavimentação, já que as exigências de qualidade como produto final são menores do que para o uso em concreto (ANGULO, 2000). Poon e Duan (2014) apontam que a qualidade do concreto de origem e o processo de britagem influenciam nas propriedades dos agregados reciclados. Isto é, o processo de reciclagem interfere no beneficiamento do resíduo, os diferentes trituradores utilizados na britagem implicam em consequências variadas sobre as propriedades físicas e mecânicas do produto final.

O processo de trituração dos agregados reciclados pode contribuir para uma desintegração adicional e fratura interna do grão (PEPE *et al.*, 2014). Assim, os

agregados reciclados podem ter propriedades significativamente diferentes em comparação com os naturais.

Bravo *et al.* (2015) destacam que as principais fontes de material inerte dos RCD são concretos e materiais cerâmicos. Existem diversas pesquisas que avaliam o uso de uma grande variedade de resíduos, em diferentes aplicações. Os agregados reciclados podem apresentar composições diversas em função das características locais, obtendo, assim, valores de resistência mecânica, diferenciados conforme sua composição (BITTENCOURT, 2012).

#### **2.1.4 Pesquisas sobre aplicações do RCD**

Muitos estudos são realizados acerca da aplicação de RCD como agregado reciclado. Aborda-se neste trabalho o uso de agregados reciclados, oriundos de resíduo da construção e demolição, em concretos, especificamente em blocos de pavimentação intertravada.

O trabalho de Corinaldesi e Moriconi (2009a) investigou a produção de concretos com substituição de 100% dos agregados reciclados miúdos e graúdos, como também concretos reciclados com a incorporação de adições minerais (sílica ativa e cinza volante). As propriedades mecânicas do concreto sem as adições minerais apresentaram menor desempenho quando comparado ao de referência. Esses autores relataram que a redução na resistência a compressão pode ser devido aos grãos dos agregados reciclados serem mais fracos do que os naturais.

Os concretos produzidos com agregados reciclados e adições minerais mostraram melhor desempenho mecânico, como também possuem menor risco de formação de fissuras devido a menor rigidez do concreto. Os autores constataram que o concreto reciclado com adições minerais também reduz a profundidade de penetração de carbonatos e de íons cloretos.

Leite *et al.* (2011) propuseram avaliar a viabilidade do uso do agregado reciclado provenientes de resíduos de construção e demolição em aplicações de pavimentação, base e sub-base. Os resultados apontam que a composição e a maneira de beneficiamento do resíduo influenciaram nas características físicas do

agregado reciclado. Os autores apontam o agregado reciclado como uma alternativa para ser utilizada em camadas de base e sub-base para estradas de baixo volume.

Morales *et al.* (2011) estudaram as características do agregado reciclado, com uma elevada variação da composição, como os materiais constituintes dos resíduos cerâmicos e gesso. O material heterogêneo foi analisado pelos ensaios recomendados pela norma espanhola para concreto estrutural. Os resultados obtidos foram comparados com as diretrizes desta norma, que regulam a utilização deste material como um componente estrutural de concreto. O resultado mostrou que a amostra não atingiu todos os requisitos previstos e estabelecidos para propriedades do agregado reciclado, cumprindo apenas parcialmente as exigências, não sendo aplicável para concreto estrutural.

Melo *et al.* (2011) elaboraram um estudo sobre a geração e gestão dos resíduos de construção e demolição na área metropolitana de Lisboa. O trabalho apresentou indicadores de geração de resíduos em torno de 954 toneladas por dia e uma taxa de 0,60 toneladas por ano, considerando tais valores significativos para a região. A pesquisa aponta que, apesar de existir uma infraestrutura instalada para a disposição final dos resíduos, foram identificados muitos depósitos ilegais.

Em 2008, Portugal adotou um regime jurídico rigoroso a respeito da educação ambiental. Assim, os autores investigaram as determinadas aplicações desta legislação que tem como objetivo reduzir a produção de resíduos, propiciar a triagem do material na sua origem e normatizar as aplicabilidades deste resíduo. Dessa forma, a legislação visa estabelecer uma cadeia de responsabilidade para todos os agentes envolvidos com o fluxo.

Amorim (2013) buscou verificar a viabilidade técnica e econômica do incremento de resíduos de construção e demolição no solo para camadas de base de pavimentos urbanos. Na pesquisa foram analisados o comportamento mecânico e o desempenho funcional de uma pavimentação asfáltica com camada de base constituída por RCD em diferentes porcentagens associados a um tipo de solo. Foi constatado que esta solução alternativa atendeu as recomendações do DNIT, visto que a composição do material promoveu uma alta capacidade de suporte para uso em obras viárias e boa qualidade para o uso desta aplicação.

Na mesma linha de pesquisa de soluções para o concreto asfáltico, Brasileiro (2013) avaliou o comportamento do agregado reciclado de RCD na execução de pavimentos flexíveis. Os resultados corroboraram com o conceito elucidado, e esta aplicação se mostrou viável tanto técnica quanto economicamente. A partir da caracterização foi observado que os agregados reciclados possuem algumas propriedades inferiores e outras superiores ao agregado convencional, mas a autora destaca que todas atenderam os limites estabelecidos em normas para a utilização em concreto asfáltico.

Destaca-se também que algumas misturas contendo agregados reciclados apresentaram características mecânicas melhores do que a mistura somente com agregados convencionais. Esta vantagem pode ser explicada pelo fato de que quando concreto asfáltico apresenta valores muito elevados de estabilidade e resistência à tração pode se tornar muito rígido, estando sujeito à formação de trincas, o que não é um aspecto positivo para o pavimento flexível.

Behera *et al.* (2014) investigaram problemas práticos do uso de agregado reciclado em concreto, esclarecendo o desempenho mecânico obtido, e apontando razões pelas quais este resíduo não se tornou amplamente aceito pela indústria da construção. Os autores destacam que apesar do desempenho mecânico e da durabilidade do concreto com agregados reciclados serem, geralmente, inferiores ao concreto convencional podem ser tecnicamente viáveis e são considerados como uma contribuição promissora para a sustentabilidade na construção civil.

Pepe *et al.* (2014) pesquisaram diferentes formas de tratamentos alternativos para beneficiar os agregados reciclados. Os autores investigaram os aspectos físicos e mecânicos dos grãos após os procedimentos, e como também os efeitos do concreto produzido no estado fresco e endurecido. Os resultados mostraram a viabilidade da “limpeza autógena”, onde este processo remove as impurezas superficiais e reduz a heterogeneidade das partículas.

Os agregados beneficiados apresentaram menores taxas de absorção de água quando comparados com aqueles que não obtiveram os procedimentos propostos. Na avaliação do concreto final, no estado fresco, mostrou um melhor desempenho em relação a reologia da mistura. O concreto produzido com os agregados reciclados

beneficiados, no estado endurecido, apresentou melhores propriedades mecânicas do que o concreto confeccionado com agregados reciclados sem beneficiamento.

Poon e Duan (2014) avaliaram o uso de agregado reciclado em concreto a partir de diferentes fontes de origem, avaliando a influência dos diferentes agregados reciclados sobre as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto. Os resultados experimentais mostram que o desempenho dos agregados reciclados variou muito. Os autores elaboraram uma linha de seleção destes materiais, o que facilita a aplicação mais ampla dos agregados reciclados em concreto.

Dilbas *et al.* (2014) investigaram o uso de agregados reciclados em concreto com a incorporação de sílica ativa. Verificou-se que os concretos com adição de sílica e agregado reciclado apresentaram melhores desempenhos, tanto no estado fresco como no estado endurecido, quando comparados aos concretos de referência.

Dhir *et al.* (2015) estudaram a incorporação de agregados reciclados em concreto, avaliando o comportamento de carbonatação do componente estrutural. Os autores identificaram vários aspectos que influenciam o uso de agregados reciclados, tais como o nível de substituição, tamanho e origem, bem como a influência da cura, a utilização de misturas químicas e adições, na carbonatação durante um longo período de tempo.

Os resultados indicaram que a relação entre a resistência à compressão e o coeficiente de aceleração à carbonatação é semelhante entre as misturas de concreto com agregado reciclado e a amostra padrão de referência feita com agregados naturais. Entretanto, a profundidade de carbonatação é maior na amostra de concreto com agregado reciclado.

Gesoglu *et al.* (2015) estudaram as propriedades dos concretos auto-adensáveis produzidos com agregados reciclados graúdos e miúdos. Os resultados indicaram que os concretos preparados com agregados reciclados obtiveram uma diminuição nas propriedades mecânicas. Destaca-se também que o desempenho do concreto com substituição de ambos os agregados reciclados foi relativamente inferior em comparação com os concretos moldados apenas com um dos agregados (graúdo ou miúdo).

Bravo *et al.* (2015) estudaram o desempenho mecânico de concretos com agregados reciclados. Os autores analisaram a influência do ponto de coleta e, conseqüentemente, a sua composição. A análise do desempenho mecânico permitiu concluir que a utilização de mais de um agregado reciclado interfere negativamente nas propriedades testadas, especialmente quando são utilizados agregados reciclados miúdos. Por outro lado, houve um aumento da resistência à abrasão quando foram usados agregados reciclados graúdos.

Xiao *et al.* (2015) analisaram o comportamento à compressão do concreto com agregado reciclado com diferentes porcentagens de substituição. Os resultados identificaram que a resistência à compressão diminuiu com o aumento percentual de substituição dos agregados reciclados. Outra conclusão obtida foi a resistência à compressão dos agregados reciclados molhados que foi menor do que a os agregados secos.

Brito *et al.* (2015) fornecem uma revisão sistemática da literatura, com base na identificação, avaliação, seleção e síntese de publicações relacionadas com o efeito da incorporação de agregados reciclados, provenientes de resíduos de construção e demolição, sobre a resistência mecânica do concreto. Os autores identificam vários aspectos que influenciam o uso de agregados reciclados, tais como o nível de substituição, tamanho e origem, bem como procedimento de mistura, aditivos químicos, adições e desenvolvimento da resistência ao longo do tempo.

Martínez *et al.* (2016) investigaram a viabilidade de incorporação da fração fina dos agregados reciclados provenientes dos resíduos de construção e demolição em argamassa de alvenaria. Os autores analisaram diferentes substituições e avaliaram três tipos de agregados reciclados: agregado de concreto, cerâmico e misto. De acordo com os resultados obtidos na pesquisa, as argamassas recicladas atingiram os limites estabelecidos pelas normas. Este estudo sugere a possibilidade de substituição de 100% dos agregados miúdos reciclados analisados.

Di Maria *et al.* (2016) pesquisaram a influência da distribuição granulométrica nas propriedades do concreto como a trabalhabilidade, resistência e durabilidade. Os autores propuseram uma alternativa para avaliar a granulometria dos agregados reciclados com o uso de imagem para estimar a distribuição de tamanho dos grãos de forma mais rápida e precisa do que os demais métodos. Como resultados, a solução

proposta se mostra viável quando comparada ao peneiramento manual, por ser operacionalizado de forma contínua, favorece uma ágil caracterização e a visibilidade do uso dos agregados reciclados.

Contreras *et al.* (2016) estudaram a viabilidade de fabricar tijolos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. Os agentes ligantes utilizados foram o cimento e a cal. Os tijolos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e porosidade. Os resultados mostram que é possível produzir tijolos de baixo custo com excelentes propriedades físicas. Os tijolos atingiram os requisitos mínimos exigidos pelas normas.

Poulikakosa *et al.* (2017) analisaram diferentes tipos de resíduos na confecção de estradas asfaltadas. Resíduos como vidro, madeira, plástico, asfalto e concreto. Para análise dos resultados foram feitos ensaios em quatro estradas hipotéticas. Os autores perceberam que aperfeiçoando as dosagens pode-se produzir asfalto adequado para pavimentação e obter uma economia de custos, além dos benefícios ambientais.

## **2.2 PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA**

### **2.2.1 Definição**

De acordo com o Manual de Pavimento Intertravado da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2010) a origem da pavimentação intertravada vem dos pavimentos revestidos com pedras, executados há quase 5.000 anos a.C., na Mesopotâmia e muito utilizados pelos romanos desde 2.000 a.C. A evolução deste pavimento ocorreu com o uso de pedras talhadas, originando os paralelepípedos. O fato de estas pedras apresentarem certo desconforto de rolamento e possuírem uma produção artesanal acarretou o desenvolvimento de peças de concretos pré-fabricadas.

Logo após a Segunda Guerra Mundial, este tipo de pavimentação difundiu-se, sendo que a produção dos blocos passou a ser industrializada, aumentando consideravelmente a quantidade de produtos finais. Esta técnica surgiu no Brasil na década de 70, entretanto, na maioria de suas aplicações não obedecem aos critérios

técnicos mínimos necessários, prejudicando a imagem dos blocos de concreto para a pavimentação (HALLACK, 1998).

A ABNT NBR 15953 (2011) define o pavimento intertravado como uma pavimentação flexível (sofrem deformações sem se romper) cuja estrutura é composta por uma camada de base (base ou sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto pré-moldadas sobrepostas em uma camada de assentamento e com as juntas entre as peças preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.

O pavimento intertravado é considerado ecologicamente correto, possuindo grande capacidade de permeabilização (Figura 2.2). Os blocos intertravados permitem a drenagem das águas da chuva pelas suas juntas, as quais possibilitam a infiltração de uma parcela das águas incidentes, amenizando desta forma o impacto ambiental.

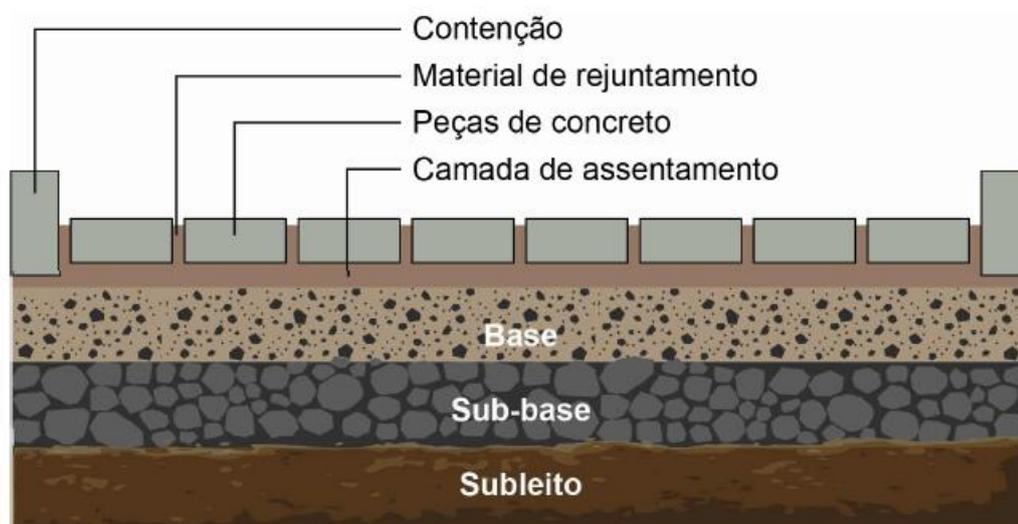


Figura 2.2 – Seção típica de um pavimento intertravado.

Fonte: Manual de Pavimento Intertravado (ABCP), 2010.

Marchioni e Silva (2011) descrevem o pavimento intertravado como uma solução viável para colaborar com a diminuição das superfícies impermeabilizantes na cidade. Essa pavimentação possui espaços livres na sua estrutura, onde a água e o ar podem atravessar. O revestimento deve permitir a passagem rápida da água, que fica armazenada por um período nas camadas base e sub-base, funcionando, assim, como um reservatório e filtro.

De acordo com a ABNT NBR 15953 (2011) as peças de concreto para pavimentação podem ser definidas como o componente pré-moldado de concreto utilizado como material de revestimento em pavimento intertravado. Eles devem apresentar uma camada superficial com acabamento confortável para o tráfego de pessoas e veículos ao mesmo tempo em que suportem as cargas as quais são solicitadas.

### **2.2.2 Processo construtivo**

O sistema produtivo adotado na fabricação de blocos de concreto, baseia-se nos equipamentos denominados vibro-prensa, que aplica, ao mesmo tempo, um esforço de compressão juntamente a um efeito de vibração para a expulsão dos vazios e moldagem das peças. Os blocos desenvolvidos para tráfegos leves (calçamentos de vias, ou passeios e em ruas internas de condomínio), devem alcançar uma resistência a compressão mínima de 35 MPa e para tráfegos pesados a resistência dos blocos deve ser superior a 50 MPa, indicados em situações onde o revestimento sofre intensos carregamentos e desgastes por atrito (ABNT NBR 9781; 2013).

As peças de concreto para pavimentação devem atender os requisitos da norma ABNT NBR 9781 (2013). A norma estabelece dimensões máximas das peças, os materiais constituintes e as resistências características. A fabricação destas peças de concreto ocorre com relativa produtividade, e o produto final possui uniformidade, com precisão dimensional e estrutural, capaz de atingir elevadas resistências e durabilidade. Essas características são alcançadas devido ao processo de fabricação industrial em vibroprensas, as quais proporcionam uma grande compactação das peças, e com isso a resistência e a durabilidade dos blocos aumenta.

Após confeccionados os blocos devem ser curados em estufas que conserve a umidade relativa constante acima dos 95%, para garantir a hidratação do cimento (ABCP, 2010). O período de cura na câmara é em torno de 24 horas e a cura final no pátio depende das condições industriais, podendo ser entre 7 e 28 dias. Dessa forma, as peças já chegam finalizadas nas obras, prontas para o assentamento; este processo industrializado garante ainda a uniformidade de cor, textura e das dimensões das peças.

A pavimentação intertravada apresenta benefícios como a facilidade de manutenção do pavimento. As peças podem ser retiradas pontualmente e recolocadas novamente, de modo que isto implica no aumento da taxa de reuso dos blocos, quando se necessita realizar serviços no subsolo do pavimento como instalações elétricas e hidráulicas, sem comprometer o restante do arranjo estrutural já acabado.

Outra característica deste sistema construtivo é sua simples execução com equipamentos de pequeno porte, considerando a liberação imediata ao tráfego, logo após o término do processo executivo, pois não exige período de cura ou secagem. Outro fator importante citado por Marchioni e Silva (2011) é a capacidade do pavimento de resistir aos esforços tangenciais em áreas de manobra, devido ao arranjo intertravado entre os blocos permitir a transmissão das tensões horizontais rapidamente e sem deslocamento.

De acordo com a ABCP (2010) o intertravamento é a capacidade que os blocos adquirem de resistir a movimentos de deslocamento individual, seja ele, vertical, horizontal ou de rotação em relação a seus vizinhos. Assim, o intertravamento é fundamental para o desempenho e a durabilidade do pavimento. As propriedades do processo de construção dos pavimentos intertravados podem ser definidas como qualidades estéticas, versatilidade do produto, facilidade de estocagem e homogeneidade.

O uso do pavimento intertravado é indicado em calçadas, praças, vias públicas, parques, estacionamentos, pátios de cargas, entre outros. Constitui uma solução eficaz para as instalações urbanas, por possuir execução simples, pouca manutenção, sem a necessidade de equipamentos sofisticados e sem a exigência de mão-de-obra qualificada (MARCHIONI; SILVA, 2011). A execução do pavimento intertravado possui diretrizes e regulamentações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 15953/2011) e da Associação Brasileira de Concreto Portland (ABCP, 2010).

Marchioni (2012) descreve as etapas de execução deste tipo de pavimentação, onde, inicialmente ocorre a preparação do subleito, o posicionamento da manta, a execução das camadas de sub-base e base, o assentamento das peças pré-moldadas, o rejuntamento e compactação.

O Manual de Pavimento Intertravado (ABCP, 2010) divide as peças pré-moldadas de concreto em três tipos básicos de formatos (Figura 2.3.):

- Tipo 1: constituídas por formas retangulares, apresentam facilidade de produção e colocação em obra, além de facilitar a construção de detalhes no pavimento. As suas dimensões são usualmente 20 cm de comprimento por 10cm de largura e as suas faces laterais podem ser retas, curvilíneas ou poliédricas (tipo utilizado nesta pesquisa).
- Tipo 2: genericamente, apresenta o formato “I” e somente pode ser montado em fileiras travadas. As suas dimensões são, usualmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura.
- Tipo 3: é o bloco que, pelo seu peso e tamanho, não pode ser apanhado com uma mão só (suas dimensões são de, pelo menos, 20 x 20 cm).

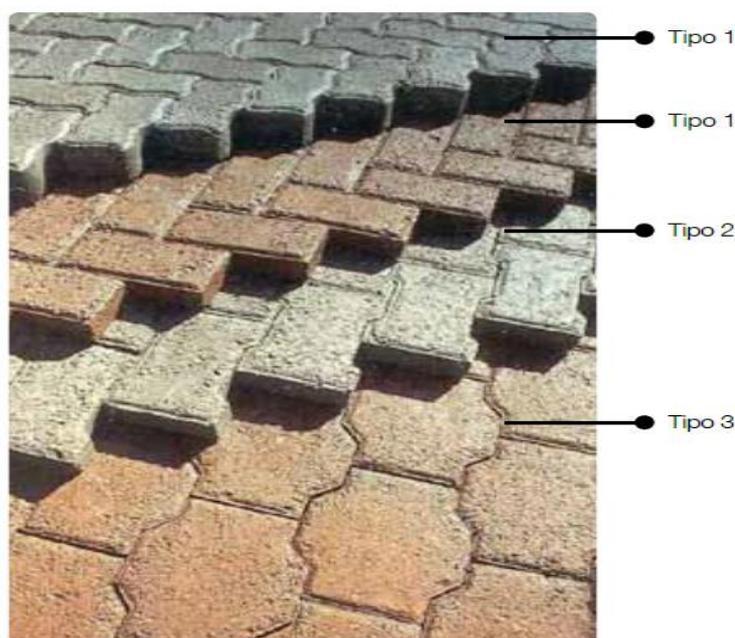


Figura 2.3 – Tipos básicos de formatos de blocos.

Fonte: Manual de pavimentação intertravada (ABCP), 2010.

A NBR 9781 (2013), norma brasileira para pavimento intertravado de peças pré-moldadas de concreto, normatiza que a variação entre as dimensões das espessuras fornecidas pelo fabricante e as reais não devem ultrapassar 5mm. A espessura das peças é padronizada em 6 cm, 8 cm e 10 cm, sendo definida em projeto conforme sua necessidade, usualmente realizada através da análise do tráfego imposto no local.

A ABCP (2010) menciona que a relação comprimento/espessura do bloco deve ser sempre menor ou igual a 4. A norma também alerta que a utilização de peças que não atingem a resistência mínima ou estejam quebradas, comprometem a qualidade

da obra, gerando perdas por abrasão, rachaduras e peças soltas. Esta norma estabelece critérios para o dimensionamento dos blocos e requisitos mínimos da resistência a compressão dependendo da sua utilização.

Godinho (2009) atribui para este tipo de pavimento três requisitos fundamentais da pavimentação, a característica estética, a capacidade estrutural e a integração com o ambiente. Assim, o autor aponta os blocos pré-fabricados como um dos produtos mais expressivos dentro dos pré-moldados que utilizam cimento Portland, no Brasil, registrado pela ABCP (2010).

Os blocos intertravados podem ser classificados como sustentáveis. A ABCP (2010) afirma que as peças são recicláveis ao fim de sua vida útil, pois os produtos à base de cimento podem ser totalmente reciclados e reutilizados na produção de novos materiais. Assim, beneficia a preservação de jazidas de recursos naturais e evita a saturação de aterros. Este tipo de pavimentação exige menor espessura da estrutura (base e sub-base), dessa forma, agride menos o solo. Destaca-se também que a produção das peças se torna menos poluente do que a fabricação de asfalto.

Os pavimentos intertravados de concreto também refletem melhor a luz do que outros tipos de superfície de pavimentação e absorvem menos calor, propiciando um conforto térmico. Outra característica do pavimento intertravado é a superfície antiderrapante, o concreto proporciona segurança aos pedestres, mesmo em condições de piso molhado.

O emprego de pavimentação de blocos de concreto intertravado não substitui e nem dispensam o projeto de pavimentação que deverá ter, no mínimo, o dimensionamento do pavimento para as condições dadas e as especificações de materiais e execução. Assim, na pavimentação intertravada, encontra-se um vasto campo para estudos que levem em conta os princípios da racionalização, industrialização, produtividade e qualidade.

Os blocos para pavimentação de concreto pré-moldados são compostos de 85-90% de agregados e são produtos confeccionados em fábricas, o que proporciona aos blocos de pavimentação de concreto boa consistência e precisão de dimensões. Estes blocos para pavimentação são fabricados a partir de misturas semi-secas com proporções de água/cimento de menos de 0,40. Assim, ao contrário dos blocos de concreto, os blocos de pavimentação devem ser totalmente compactados para atingir

uma densidade mais elevada, o que ocorre durante o processo de fabricação que envolve uma combinação de vibração e força de compressão.

### **2.2.3 Reaproveitamento de RCD em blocos intertravados**

A forma mais difundida de beneficiamento do RCD é a simples segregação da fração mineral para ser triturada até a granulometria desejada. A reciclagem na construção civil pode gerar benefícios com reflexos diretos na redução do consumo de recursos naturais não renováveis e reaproveitamento de resíduos gerados empregados no processo construtivo. Uma dessas aplicações é a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado oriundo dos resíduos da construção e demolição na fabricação dos blocos pré-moldados de concretos para a pavimentação intertravada. Algumas pesquisas investigam esse produto final.

Poon *et al.* (2002) desenvolveram as primeiras pesquisas de produção de blocos de pavimentação utilizando agregados reciclados obtidos a partir de resíduos da construção e demolição de obras. A substituição foi realizada em porcentagens diferentes tanto do agregado miúdo quanto agregado graúdo. Os resultados indicam que os teores de 25 e 50% de substituição tiveram pouco efeito na resistência a compressão, entretanto, acima disso, as propriedades mecânicas foram atingidas significativamente. Os autores pesquisaram a influência de cinzas volantes, que quando adicionadas auxiliavam no ganho de resistência.

Hood (2006) pesquisou a substituição apenas do agregado miúdo natural por agregado reciclado para confecção de blocos de concreto para pavimentação. Foi utilizado diferentes teores de substituição e os ensaios realizados para avaliar o comportamento dos blocos foram resistência a compressão, resistência a abrasão e absorção de água. A partir dos resultados encontrados através dos ensaios foi possível verificar o teor ideal de substituição de até 25% de material reciclado.

Estudos realizados por Cavalcanti *et al.* (2011) comprovaram que a substituição total de agregados reciclados pode ser utilizada na confecção de blocos de concreto intertravados para pavimentação somente de ruas pouco movimentadas, calçadas e jardins, pois os blocos com 100% de agregados reciclados não obtiveram a resistência

mínima recomendada em norma. A dosagem utilizada foi com maiores proporções de agregado graúdo do que areia reciclada.

Soutsos *et al.* (2012) realizaram um estudo com a utilização de RCD como agregado reciclado na fabricação de blocos de pavimentação. Na confecção destas peças de pré-moldados a técnica usada é a vibro-compactação, na qual o produto é vibrado e prensado ao mesmo tempo. O trabalho experimental envolveu dois tipos de RCD, um derivado apenas de resto de concreto e outro proveniente de resíduos de alvenaria.

As variações de substituição investigadas foram blocos apenas com o agregado graúdo reciclado, outro traço somente com o agregado miúdo reciclado, e por último, uma mistura da fração fina e grossa dos agregados. As propriedades analisadas foram as resistências mecânicas (compressão e tração). As resistências mecânicas não foram relativamente alteradas, entretanto, a alta absorção de água dos blocos feito com agregados reciclados é significativa, o que pode indicar um fator negativo para a durabilidade. Os resultados apontam que os agregados reciclados de RCD podem ser utilizados para este produto final.

Bittencourt (2012) desenvolveu blocos com diferentes porcentagens de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, provenientes de resíduos de construção e demolição, e areia de fundição. Neste trabalho avaliou-se o desempenho mecânico e físico dos blocos confeccionados. As análises mostraram que, de maneira geral, o aumento na proporção de substituição produz uma redução na resistência à compressão dos blocos. A substituição por areia reciclada na proporção de 20% não alterou significativamente as propriedades mecânicas. Já a substituição por 40% de agregado miúdo reciclado e 20% de agregado graúdo reciclado e 40% de areia de fundição alteraram o comportamento mecânico dos blocos promovendo a redução da resistência à compressão.

Jankovic *et al.* (2012) analisaram a possibilidade de produzir blocos de pavimentação com substituição de agregado reciclado proveniente de tijolos cerâmicos. Os resultados mostraram que os blocos com substituição de até 32,5% de agregados naturais por tijolos triturados atendem os requisitos das normas.

Foi observado também que a resistência a abrasão diminuiu à medida que aumentou a porcentagem de substituição, como também a densidade do bloco foi

reduzida. A absorção de água dos blocos com agregado reciclado foi aumentada. Como resultados desta pesquisa, os autores verificaram que a produção de blocos de concreto com agregados reciclados de tijolos pode ser viável, dependendo da qualidade do resíduo e da porcentagem de substituição de agregados naturais.

Sabai *et al.* (2013) estudaram a viabilidade de produção de blocos de concretos com agregados reciclados na Tanzânia. Foram coletadas oito amostras de resíduos de construção e demolição em diferentes locais para a produção do agregado reciclado. A caracterização física, química e mecânica dos grãos foi realizada. Para a produção dos blocos, a substituição realizada foi de 100% de agregados para as frações finas e graúdas. Os resultados mostraram que os blocos produzidos com agregados reciclados possuem menores resistências mecânicas e maiores absorção de água quando comparada aos blocos de referência. Entretanto, os blocos reciclados satisfizeram as normas e especificações exigidas para concreto não-estrutural.

Vieira e Pereira (2015) estudaram a viabilidade técnica da confecção de blocos de concreto vazado simples para vedação, com a utilização de RCD como agregados reciclados. Os blocos foram confeccionados com substituição dos agregados naturais pelo RCD nas porcentagens de 30, 50 e 100%. Os resultados obtidos demonstram que tecnicamente é possível confeccionar blocos de vedação de concreto utilizando RCD. No entanto, maiores estudos são necessários para a verificação da viabilidade econômica.

Ganjian *et al.* (2015) investigaram o uso de sub-produtos e resíduos como agregado reciclado de concreto e de tijolos para fabricação de blocos de pavimentação. As combinações de misturas binárias e ternárias foram consideradas. Os blocos com substituição de 100% de areia por agregado reciclado miúdo atenderam as especificações da norma para os testes de absorção de água e resistência à compressão.

Ozalp *et al.* (2016) pesquisaram os critérios de utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto na produção de materiais cimentícios pré-moldados. A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o uso de agregados reciclados na produção de elementos de concreto é possível com a separação e classificação adequadas do resíduo, propondo uma triagem seletiva

antes da britagem. Além disso, os autores frisam que devem ser aplicadas taxas de substituição mais baixas para obter produtos finais especificados em normas.

Penteado *et al.* (2016) investigaram a utilização de resíduos de cerâmica em substituição parcial do cimento e da areia para a confecção de blocos de concreto para pavimentação. As porcentagens foram 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Os ensaios realizados com os blocos foram resistência à compressão, absorção de água e porosidade.

Os resultados obtidos apresentaram um incremento da resistência à compressão dos blocos com substituição da areia quando comparado aos blocos de referência. Com o aumento da substituição da areia, a absorção de água foi reduzida, devido ao efeito de enchimento, o que favorece a durabilidade do bloco. Apesar dos blocos confeccionados com substituição da areia possuir melhor desempenho do que aqueles blocos com substituição de cimento. Todos os blocos nesta pesquisa cumpriram as exigências das normas.

Rodriguez *et al.* (2016) avaliaram a possibilidade da utilização de agregados reciclados mistos na fabricação de concretos pré-moldados não estruturais como blocos de pavimentação. Para isso, as substituições foram de 25%, 50%, 75% e 100%. Os ensaios realizados foram: resistência à compressão, resistência à flexão, absorção de água, tolerância dimensional e resistência ao desgaste. Os resultados mostraram ser viável esta utilização, pois todos os blocos satisfizeram os requisitos das normas.

## CAPÍTULO 3

# Materiais e Métodos

Para a elaboração desta pesquisa foi realizado um programa experimental baseado em ensaios de laboratório e de campo. A primeira etapa destinou-se a caracterização dos agregados utilizados, envolvendo ensaios físicos, químicos, mineralógicos e microscópicos. Na segunda etapa foram moldados corpos de prova de concreto para averiguar as dosagens dos blocos. Após a verificação dos traços, ocorreu a terceira etapa, na qual se confeccionou os blocos de concreto para pavimento intertravado. Por fim, como forma de avaliar o efeito dos blocos numa escala de campo, foi executado um trecho experimental (protótipo). Cada uma destas etapas é apresentada com detalhes a seguir.

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Cimento

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado o cimento Portland composto com pozolana e resistente a sulfatos (CP II-Z-RS), normatizado pela NBR 11578 (1997) e NBR 5737 (1992). O cimento utilizado é o usual nas indústrias de pré-moldados da região. As propriedades físicas, mecânicas e químicas desse material são apropriadas para este uso e estão apresentadas nas Tabelas de 3.1 a 3.4, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.1 – Composição física e mecânica do cimento Portland CP II-Z-RS.

Propriedades	Norma	Resultado
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 23/01	3,15
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 46/06	1,04
Resistência à compressão (MPa)	NBR NM 7215/97	7 dias: 16,5
		28 dias: 24,5

Fonte: MIZU (2015).

Tabela 3.2 – Composição química do cimento Portland CP II-Z-RS.

Parâmetros	Composição química			
	PF (%)*	RI** (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO Livre (%)
Média	5,04	13,61	3,21	1,76
Desvio	0,38	0,48	0,10	0,23
Limites da ABNT	< 6,5	< 16,0	< 4,0	-

\* Perda ao fogo; \*\* Resíduo insolúvel.

Fonte: MIZU (2015).

Tabela 3.3 – Propriedades físicas do cimento Portland CP II-Z-RS.

Parâmetros	Propriedades físicas						
	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	#325 (%)	#200 (%)	Pega	
						Início (h)	Fim (h)
Média	3,00	4.362	1,08	14,17	2,18	139	191
Desvio	0,02	105,65	0,19	0,59	0,21	4,25	6,31
Limites da ABNT	-	≥ 2.400	-	-	≤ 12	≥ 60 mim	

Fonte: MIZU (2015).

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas do cimento Portland CP II-Z-RS.

Parâmetros	Resistência à compressão		
	03 dias MPa	07 dias MPa	28 dias MPa
Média	18,91	26,36	36,92
Desvio	0,80	0,68	-
Limites da ABNT	≥ 10	≥ 20,0	≥ 32,0

Fonte: MIZU (2015).

### 3.1.2 Agregado miúdo

Os agregados miúdos utilizados para a confecção dos blocos de pavimentação intertravada são de dois tipos, areia natural e areia reciclada de RCD (Figura 3.1) oriunda de uma Usina de Reciclagem.



Figura 3.1 – Agregados miúdos: (a) Natural; (b) Reciclado.

A areia foi coletada segundo a NBR NM 26 (2009), seca em estufa ( $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) por 48 horas e, posteriormente, resfriada à temperatura ambiente. Após esse procedimento foram submetidas aos ensaios de caracterização.

### 3.1.3 Agregado graúdo

Os agregados graúdos também foram utilizados segundo dois tipos de materiais, natural e o reciclado proveniente da usina mencionada anteriormente (Figura 3.2). O agregado graúdo reciclado foi seco em estufa antes da realização dos ensaios de caracterização.



Figura 3.2 – Agregados graúdos: (a) Natural; (b) Reciclado.

### 3.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado nessa pesquisa foi SikaPaver® HC – 10, indicado para dosagens de baixos consumos de cimento em concreto semi-seco, que são geralmente fabricados em máquinas de compactação produzindo as peças no mesmo instante da moldagem.

### 3.1.5 Água

A água utilizada para preparo dos traços foi fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos do RN - CAERN.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RCD

Na fase inicial da pesquisa tornou-se necessária uma caracterização minuciosa dos agregados reciclados oriundos dos resíduos de construção e demolição tanto nas frações miúdas quanto graúdas. A NBR 7211 (2009) indica as características dos agregados para concreto, destacando as propriedades de porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência a compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes como as mais influentes no produto final.

A coleta dos agregados reciclados foi realizada diretamente na Usina no segundo semestre de 2015, de acordo com a NBR 26 (2009) e a NBR 27 (2001), as quais normatizam a amostragem de agregados e redução para ensaios de laboratório. Para cada agregado (miúdo e graúdo) foram retiradas amostras do montante depositado em pilhas (material já estocado como mostra na Figura 3.3-a) e do produto final das correias de transporte (material da produção diária da usina mostrado na Figura 3.3-b).

A coleta foi realizada durante um mês, a fim de averiguar a variação da composição ao longo do tempo. As peneiras utilizadas na usina que são acopladas ao britador são de diferentes granulometrias para o material desejado. Para a areia reciclada a peneira #4,75 é o diâmetro máximo. Para a brita utiliza-se a peneira #12,5.



Figura 3.3 – (a) Pilhas de estoque de material na usina; (b) Produção diária dos agregados reciclados.

Em conformidade com a dimensão característica do agregado, a quantidade total de cada amostra foi de 25 kg. No total, foram coletadas dezesseis amostras de cada tipo de agregado. Inicialmente, para cada amostra, antes da realização dos procedimentos foi feito o quarteamento conforme especificação em norma (Figura 3.4). As coletas também seguiram a norma NBR 10007 (2004) que direciona o processo de homogeneização e quarteamento para a obtenção de uma amostra representativa.



Figura 3.4 – Quarteamento: (a) Agregado reciclado miúdo; (b) Agregado reciclado graúdo.

Os ensaios realizados para a caracterização dos agregados para a análise microscópica, composição química e mineralógica são a microscopia eletrônica de

varredura (MEV), fluorescência de raios X (FRX) e difratograma de raio X (DRX). Para estes procedimentos realizou-se uma segregação manual pela cor (cinza e vermelho) dos agregados graúdos, e, em seguida, o material foi destorroado para ser submetido aos ensaios. Cada fração está representada na Figura 3.5.

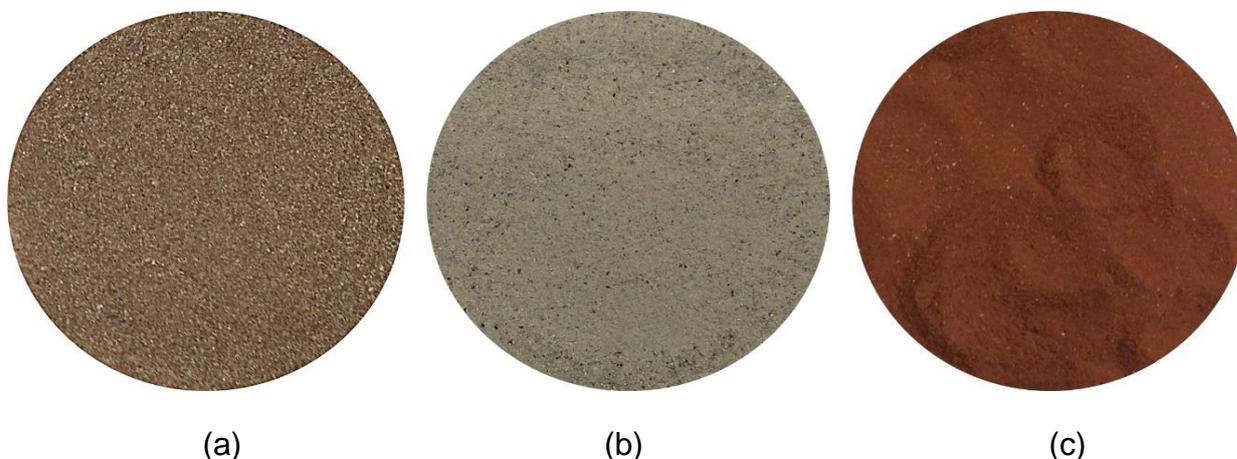


Figura 3.5 – Amostras dos agregados reciclados utilizadas nos ensaios de FRX, DRX e MEV: (a) AR misto; (b) AR cinza; (c) AR vermelho.

Para avaliar os RCD fisicamente, os ensaios foram realizados de acordo com a normatização vigente para cada uma das amostras coletadas. Para os agregados miúdos, os ensaios realizados encontram-se descritos conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Ensaios normatizados da caracterização do agregado miúdo.

<b>Caracterização do agregado miúdo</b>	
<b>Ensaios</b>	<b>Normas</b>
Distribuição granulométrica	NBR NM 248:2003
Massa Unitária	NBR NM 45:2006
Massa Específica	NBR NM 52:2009
Material Pulverulento	NBR NM 46:2003
Impurezas orgânicas	NBR NM 49:2001
Inchamento de areia	NBR 6467:2006

Para os agregados graúdos os ensaios previstos encontram-se descritos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Ensaios normatizados da caracterização do agregado graúdo.

Caracterização do agregado graúdo	
Ensaios	Normas
Distribuição granulométrica	NBR NM248:2003
Massa Unitária	NBR NM 45:2006
M. Específica do agregado seco	NBR NM 53:2009
M. Específica do agregado saturado superfície seca	NBR NM 53:2009
M. Específica Aparente	NBR NM 53:2009
Absorção de água	NBR NM 53:2009
Material Pulverulento	NBR NM 46:2003
Impurezas orgânicas	NBR NM 49:2001
Abrasão “Los Angeles”	NBR NM 51:2001
Índice de forma pelo método do crivo	DNER – ME 086:1994
Índice de forma pelo método do paquímetro	NBR 7809:2008

Na Figura 3.6 é possível observar testes feitos com os agregados.



Figura 3.6 – Ensaios dos agregados: (a) Massa específica da areia reciclada; (b) Massa unitária do agregado reciclado graúdo.

### 3.3 DOSAGEM

Com a caracterização dos agregados naturais e reciclados foi determinada a adaptação de um traço padrão obtido por uma empresa de pré-moldados de Mato Grosso. O traço utilizado em volume foi 1:6:2:0,4 (cimento, areia, brita e água). Por motivos de sigilo e acesso, trabalhou-se com o traço padrão convencional da empresa de pré-moldados de outro estado. No que diz respeito à confecção dos blocos foram realizadas quatro concepções diferentes nas dosagens conforme detalhes a seguir.

O bloco padrão (amostra de referência) foi produzido com agregados de origem natural (convencional). Uma outra concepção de bloco teve a substituição do agregado miúdo natural por 100% do agregado miúdo reciclado, mantendo o agregado graúdo natural. Um terceiro tipo de bloco foi realizado com a composição contrária, utilizando areia natural e substituição do agregado graúdo natural pelo o reciclado. A última variação de bloco foi feita com a substituição total de todos os agregados naturais pelo o emprego de materiais reciclados. A Figura 3.7 esboça as concepções adotadas para a dosagem.

As dosagens em que envolvem material reciclado foram desmembradas em três possibilidades de trabalhar o agregado da seguinte forma: condição seca, lavada e saturada. Na condição seca foram utilizados os agregados reciclados sem nenhum tipo de beneficiamento, de modo que tanto a fração miúda, quanto a graúda, foram introduzidas na mistura da mesma forma que saem da usina.

Na condição lavada os agregados reciclados foram submetidos a uma lavagem para retirada do material pulverulento, a peneira usada na lavagem foi de #200 (0,075mm). Após a lavagem dos agregados reciclados, estes foram secos para então ser inseridos na mistura.

Na condição saturada, os agregados foram imersos na água por 24 horas antes de ser inseridos na mistura.

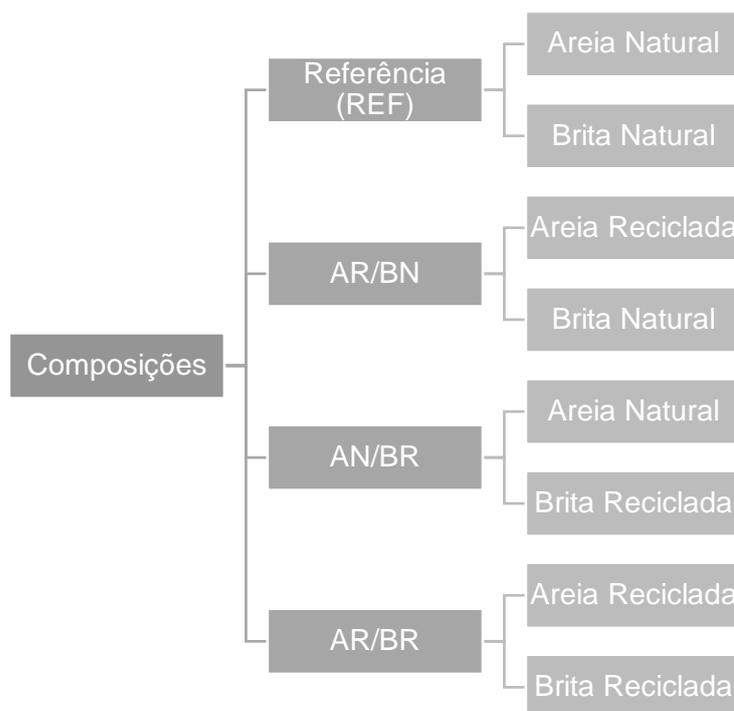


Figura 3.7 – Dosagens dos blocos intertravados.

De acordo com Jochem (2012) e Pedrozo *et al.* (2008) a fração menor que 0,15mm possui maior área específica, de modo que, segundo esses autores, essa fração absorve um maior teor de água, o que pode ser uma característica prejudicial na mistura. Silva (2014) constatou que a alta taxa de absorção de água dos agregados reciclados pode ser devido tanto a grande porosidade deste material como também pela presença significativa da quantidade de finos existentes no entulho.

Outro fator negativo para o produto final devido ao elevado teor de material pulverulento dos agregados é a redução na resistência mecânica, averiguado no trabalho de Bourscheid e Souza (2010) que abordam a necessidade de limitar essa quantidade de finos para a produção de concretos e blocos de alvenaria. Dessa forma, os agregados reciclados passaram pelo tratamento da lavagem e em seguida, foram secos para então ser adicionados a mistura de concreto.

Por fim, na condição saturada, os agregados reciclados foram imersos em tanques com água em temperatura ambiente por um período de 24 horas e secos superficialmente no momento de sua utilização nas composições definidas. Carneiro *et al.* (2000) retrata que de forma geral, os agregados reciclados possuem maior porosidade em comparação aos agregados naturais, o que implica numa absorção de

água elevada. Esta propriedade é dependente da composição e origem do entulho que gera o agregado reciclado.

A maior absorção de água dos agregados reciclados é atribuída à presença de materiais porosos. Bourscheid e Souza (2010) sugerem saturar o agregado reciclado, o que aumenta a relação água/cimento e, pode implicar na redução da resistência. Miranda (2005) recomenda que durante a mistura, o agregado seja colocado em contato com o cimento somente após estar saturado, de modo que evite que o agregado absorva o cimento diluído na água.

Dal Molin *et al.* (2004) para relativizar o efeito negativo da alta absorção de água dos agregados reciclados adicionou a mistura uma compensação de água; quantidade extra de água na mistura para evitar que os agregados reciclados não absorvam a água destinada ao traço. A compensação de água foi de 50% da taxa de absorção dos agregados.

Uma das soluções proposta por Poon *et al.* (2002) a fim melhorar a trabalhabilidade, é de mudar a condição de umidade do agregado reciclado antes da mistura. A dosagem com agregado reciclado úmido diminuiria o efeito da absorção dos agregados e tornaria o concreto mais trabalhável. Assim, adota-se nesta pesquisa como variáveis a lavagem e saturação apenas dos agregados reciclados.

Previamente à fabricação dos blocos intertravados, foram moldados corpos de provas cilíndricos com uma dosagem manual experimental feita no laboratório para averiguar as condições das misturas. A Tabela 3.7 apresenta as proposições das dosagens.

Durante a moldagem dos corpos de prova foi evidenciada a impossibilidade de se trabalhar com a areia reciclada na condição saturada, visto que o concreto se apresentou altamente fluido, o que não é recomendável para a produção de blocos. Após a confirmação dos traços, na qual foram descartadas as amostras com areia reciclada saturada, foram confeccionados os blocos intertravados utilizando resíduos de construção e demolição em substituição total dos agregados naturais, nas condições já especificadas.

Tabela 3.7 – Descrição dos traços utilizados.

<b>Descrição</b>	<b>Composição do bloco</b>	<b>Condição do AR</b>
Traço 1	Areia Natural + Brita Natural	-
Traço 2	Areia Natural + Brita Reciclada	Seco
Traço 3	Areia Natural + Brita Reciclada	Lavado
Traço 4	Areia Natural + Brita Reciclada	Saturado
Traço 5	Areia Reciclada + Brita Natural	Seco
Traço 6	Areia Reciclada + Brita Natural	Lavado
Traço 7	Areia Reciclada + Brita Natural	Saturado
Traço 8	Areia Reciclada + Brita Reciclada	Seco
Traço 9	Areia Reciclada + Brita Reciclada	Lavado
Traço 10	Areia Reciclada + Brita Reciclada	Saturado

A confecção dos blocos ocorreu em uma fábrica de pré-moldados. A análise de tolerância dimensional dos blocos foi realizada segundo a NBR 9781. A norma refere-se às dimensões do bloco como 10x20x6cm (largura x comprimento x espessura), admitindo 3 cm de tolerância.

O desempenho mecânico foi avaliado nas idades de 7, 14, 28 e 270 dias com seis blocos de cada amostra. As normas que regem os ensaios no estado endurecido para os blocos de concreto para pavimentação são a NBR 9780 (1987) e a NBR 9781 (2013). As normas exigem que as duas placas auxiliares para o ensaio de resistência à compressão devem ser circulares, com diâmetro de 85 mm e espessura mínima de 20 mm, confeccionadas em aço, como pode ser visto na Figura 3.7. Pode-se observar também a diferença entre os blocos rompidos confeccionados com agregados naturais e reciclados.



Figura 3.8 – Ensaio de resistência à compressão: (a) Equipamento com as duas placas acopladas; (b) Blocos rompidos com material reciclado e natural.

Além dos ensaios de resistências mecânicas, também foi analisada a absorção de água em idades de 28 e 270 dias com três blocos de cada dosagem. Para a análise de absorção de água foram realizados dois ensaios conforme as normas NBR 9781 (Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio) e NBR 9778 (Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica) como podem ser vistos nas Figuras 3.9 e 3.10. Realizou-se a análise dos restos dos blocos rompidos aos 28 dias pelo DRX.



Figura 3.9 – Ensaio de absorção de água: (a) imersão segundo a NBR 9781; (b) ensaio de acordo com NBR 9778.



Figura 3.10 – Ensaio de absorção de água: (a) pesagem na balança hidrostática; (b) pesagem do bloco saturado.

### 3.4 FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS REALIZADOS

Como forma de apresentar uma síntese dos procedimentos adotados durante o programa experimental desde os ensaios de caracterização até a produção dos blocos intertravados da pesquisa, segue um esquema representativo para as etapas evidenciadas.



### Caracterização dos agregados reciclados

- física;
- química;
- mineralógica;
- microscópica.



### Dosagem experimental no laboratório

- confecção dos corpos de prova cilíndricos com dimensões 10x20cm.
- determinação das condições dos agregados;
- ensaios de resistência à compressão aos 28 dias.



### Confecção dos blocos intertravados na fábrica de pré-moldado

- blocos confeccionados com dimensões 10x20x6cm.
- resistência a compressão aos 7, 14, 28 e 270 dias;
- absorção de água aos 28 e 270 dias;
- DRX dos blocos após rompimento aos 28 dias;
- Análise do protótipo

### 3.5 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS BLOCOS INTERTRAVADOS

A partir da geração dos resíduos de construção nas obras da grande Natal/RN devido a diversos fatores, os materiais tido como mistos são armazenados em caçambas para serem enviados para a usina de reciclagem (Figura 3.11-a). Ao chegar na usina, a primeira etapa é a pesagem (Figura 3.11-b). Dessa forma, a balança contabiliza o RCD entregue por cada construtora a usina de reciclagem.



(a)



(b)

Figura 3.11 – (a) Resíduos produzido em obra; (b) Pesagem do material na usina.

Logo após a pesagem, o material é descarregado no local apropriado para a primeira triagem manual (Figura 3.12-a), para a retirada dos contaminantes mais visíveis. Em seguida, um trator espalha o material em fileiras para a segunda triagem (Figura 3.12-b).



(a)



(b)

Figura 3.12 – (a) Primeira triagem realizada na usina; (b) Espalhamento do material para a segunda triagem.

Após a sequência de triagens o material selecionado é encaminhado para a etapa de britagem. O britador utilizado na usina de reciclagem é o de mandíbula com granulometria específica conforme as peneiras requeridas (Figura 3.13-a). No próprio britador, ao longo das esteiras ocorre uma terceira triagem manual (Figura 3.13-b).



(a)



(b)

Figura 3.13 – (a) RCD depositado no britador; (b) Terceira triagem na esteira.

A correia transportadora dos materiais reciclados possui uma estrutura simples, sendo instalada de forma inclinada. Estas correias são os equipamentos que conectam as peneiras ao britador de mandíbulas. É oportuno destacar que ao longo da esteira são instalados separadores magnéticos para a retirada de materiais metálicos dos resíduos. O agregado reciclado é produzido conforme as peneiras acopladas (Figura 3.14-a) e, em seguida, o material é armazenado em pilhas (Figura 3.14-b).



(a)



(b)

Figura 3.14 – (a) Agregado reciclado produzido conforme a peneiração acoplada ao britador; (b) Pilhas de estoque de material na usina.

Para a confecção dos blocos de pavimentação, os agregados reciclados da usina foram levados para a empresa de pré-moldados, depositados em local apropriado e identificados devidamente (Figura 3.15-a). Cada fração do material foi separada para o devido tratamento (lavagem e saturação). Depois desses procedimentos, os materiais foram colocados em padiolas para serem misturados na máquina de vibro-prensa (Figura 3.15-b).



(a)



(b)

Figura 3.15 – (a) Material reciclado sendo descarregado na fábrica de pré-moldados; (b) Máquina de vibro-prensa utilizada para fabricar os blocos.

Para a confecção dos blocos, o material dosado em volume foi depositado na máquina de vibro-prensa (Figura 3.16-a). De forma concomitante a deposição, os moldes para os blocos foram lubrificados para iniciar a fabricação (Figura 3.16-b).



(a)



(b)

Figura 3.16 – (a) Composição granulométrica sendo colocada na vibro-prensa ; (b) Detalhes dos moldes empregados para os blocos excutados.

Realizada a mistura dos constituintes no interior da moega de alimentação, a mistura é levada por uma esteira para moldagem, compactação e vibração dos blocos (Figura 3.17-a). Os suportes de madeira, onde os blocos são acoplados após a fabricação, são lubrificados, de forma que a madeira não absorva água do bloco.

Finalizada essa etapa, logo após a fabricação, os blocos foram armazenados numa estufa por 72 horas (Figura 3.17-b). A cura das peças confeccionadas foi realizada conforme os procedimentos usuais realizados na fábrica. A estufa se caracteriza por uma câmara, onde os blocos são armazenados de forma a não ocorrer a evaporação prematura da água, protegidos do vento e da insolação direta nos primeiros dias. Durante o dia, ocorre três aspersões para evitar a perda de água do bloco e não interferir nas reações de hidratação do cimento.



(a)



(b)

Figura 3.17 – (a) Blocos sendo produzidos na fábrica de pré-moldados;

(b) Acondicionamento dos blocos em câmara úmida.

Como forma de preservar a integridade dos blocos, os mesmos foram paletizados para serem transportados até a usina de reciclagem (Figura 3.18-a). No intuito de promover uma diferenciação para cada uma das dosagens, realizou-se uma pintura para cada um dos traços, nos blocos previamente fabricados (Figura 3.18-b).



Figura 3.18 – (a) Paletização dos blocos confeccionados; (b) Pintura dos blocos para diferenciar as dosagens na construção do protótipo.

### 3.6 EXECUÇÃO DE UM TRECHO EXPERIMENTAL (PROTÓTIPO)

Para avaliar a desenvoltura dos blocos foi executado um trecho experimental de pavimentação intertravada com os produtos confeccionados. O protótipo foi construído na Usina de Reciclagem, a qual forneceu os materiais reciclados. O segmento foi dividido em partes para avaliação de cada variável do traço, a fim de analisar o desempenho funcional do produto final. Dentre os traços definidos por meio da Tabela 3.7, foram confeccionados na fábrica de pré-moldados 08 traços, uma vez que os traços previamente definidos com a utilização da areia na condição saturada tornaram-se inviável.

A construção do protótipo foi executado em uma área da própria usina de reciclagem, em local submetido a uma movimentação moderada de carga. A Figura 3.19 ilustra detalhes do trecho executado.



(a)

(b)

Figura 3.19 – (a) Protótipo construído na usina de reciclagem com os blocos confeccionados na fábrica de pré-moldados; (b) As seções dos blocos pintados foram separadas conforme as misturas.

## CAPÍTULO 4

# Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados no desenvolvimento desta pesquisa, desde a caracterização dos agregados utilizados das amostras produzidas em laboratório até o desempenho dos blocos de concreto fabricados.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

#### 3.4.1 Caracterização física

Uma das principais diferenças dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais é a heterogeneidade da composição. Assim, o material graúdo coletado na pesquisa foi analisado visualmente a partir de cada amostra para estabelecer a porcentagem de constituintes no RCD.

A Tabela 4.1 apresenta a média da composição dos agregados reciclados utilizados na pesquisa. Considera-se a fração cinza todo material composto por resto de concreto, argamassa e rochas. Já a fração vermelha caracteriza-se pelos materiais cerâmicos. Os contaminantes são os rejeitos como isopor, plásticos, que não foram retirados nas triagens da usina.

Tabela 4.1 – Composição dos agregados reciclados utilizados.

<b>Constituintes</b>	<b>Porcentagens</b>
Fração cinza	80%
Fração vermelha	10%
Contaminantes	8%
Material asfáltico	2%

Ressalta-se que a composição do RCD é bastante variável, dependendo dos tipos de resíduos recebidos durante a produção de agregados. Na usina, onde foi coletado o material, é feito um manejo do material a ser reciclado para garantir uma relativa uniformidade do agregado produzido. Torna-se necessário fazer essa prévia homogeneização do entulho, a fim de dosar as quantidades de cada fração do RCD que pode ser reciclada sem afetar consideravelmente as propriedades dos agregados reciclados. A composição do agregado reciclado é um fator fundamental, pois afeta diretamente as propriedades do produto final.

Cada resíduo oriundo de materiais diferentes possui um comportamento ao confeccionar o concreto. Durante a produção do agregado na usina não se despeja no britador uma caçamba somente com material cerâmico. Altos teores de resíduos cerâmicos reduzem a qualidade e resistência dos agregados.

Carneiro *et al.* (2000) identifica a caracterização do agregado reciclado como uma das etapas imprescindíveis para a reciclagem, já que os fatores de geração e composição interferem na qualidade do produto final. A determinação de cada fração dos constituintes do agregado reciclado implica em alternativas para o seu tratamento e aproveitamento.

A composição do RCD é bastante diversificada e depende de vários fatores. A Tabela 4.2 apresenta as porcentagens de cada material constituinte do agregado reciclado em diferentes trabalhos. Assim, destaca-se a heterogeneidade deste material, que dificulta a difusão do seu emprego na construção civil. A composição do RCD pode abranger uma enorme diversidade de materiais (concreto, madeiras, solos, cerâmicas, gesso), provenientes de atividades como construção, demolição, reforma e até mesmo limpeza de terreno.

Girardi (2016) afirma que a quantidade de cada tipo de resíduo depende tanto da forma de coordenação de equipes e controle de materiais quanto das condições de construção de cada obra e suas especificidades como projeto padrão, flexibilização etc. Por isso é imprescindível conhecer a procedência do material que originou o RCD.

Tabela 4.2 – Composição dos agregados reciclados em outras pesquisas.

<b>Autores</b>	<b>Argamassa /Concreto</b>	<b>Rocha</b>	<b>Cerâmica</b>	<b>Solo</b>	<b>Outros</b>
Zordan, 1997	59%	18%	23%	-	-
Silva Filho, 2005	63%	-	29%	-	8%
Corinaldesi et al., 2009a	70%	-	27%	-	3%
Cabral et al., 2010	52%	4%	26%	-	18%
Tessaro et al., 2012	32%	-	31%	25%	12%
Lovato et al., 2012	63%	2%	35%	-	-
Sabai et al., 2013	100%	-	-	-	-
Lopez-Gayarre et al., 2015	12%	5%	54%	-	29%
Girardi, 2016	57%	-	43%	-	-

Assim, torna-se necessário considerar as particularidades dos resíduos utilizados na produção dos agregados reciclados. Zordan (1997) destaca que as propriedades do resíduo dependem do tipo e fase da obra de origem, das técnicas construtivas empregadas, do perfil da atividade econômica, da localização geográfica e do desenvolvimento da indústria da construção local. Para Mehta e Monteiro (2008) as principais dificuldades na reciclagem do entulho são os custos de britagem, o elevado teor de material pulverulento e a presença de contaminantes na composição.

Para a caracterização do material trabalhado foram feitos ensaios tanto para os agregados naturais quanto para os agregados reciclados de forma a melhorar a comparação entre eles e justificar resultados nos concretos produzidos. Amadei *et al.* (2012) aborda que as principais propriedades dos agregados reciclados que dificultam seu uso em concreto são a massa específica, absorção de água e o material pulverulento. A Tabela 4.3 apresenta a média dos resultados das amostras coletadas de agregado miúdo.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios físicos do agregado miúdo.

	<b>Areia Natural</b>	<b>Areia Reciclada</b>
Dimensão máxima (mm)	2,36	4,75
Módulo de finura	2,17	2,27
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1,49	1,44
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,62	2,51
Material pulverulento (%)	1%	7%
Inchamento	1,29	1,21
Matéria orgânica	Ausente	Ausente

No geral, os agregados reciclados apresentam massas específicas e unitárias menores que os agregados naturais. Isto pode ser atribuído ao fato da heterogeneidade da composição dos resíduos, os quais contêm fração de materiais porosos. Isto influencia nas massas específicas dos produtos finais, que também tendem a ser menores que as de argamassa e concretos convencionais (LIMA, 1999). O tipo de resíduo utilizado afeta a quantidade de vazios, de modo que quanto menor a massa unitária, maior o volume de vazios do material. Os vazios são originados pela porosidade e diversidade do tamanho das partículas.

Dessa forma, os agregados reciclados apresentam uma significativa variação de suas propriedades, que dependem tanto da composição do resíduo processado, quanto dos equipamentos utilizados para a reciclagem (PINTO, 1999). Devido a tais diferenças das propriedades entre o agregado reciclado e o agregado convencional, é imprescindível determinar as dosagens e as condições de aplicação a fim de diagnosticar uma compensação da quantidade de material utilizada no traço das misturas. Por esta razão, o traço unitário utilizado nesta pesquisa foi em volume.

A massa específica e a massa unitária do agregado são bastante relevantes por identificar a interação entre as partículas, fator de empacotamento, porosidade e índice de vazios (GIRARDI, 2016). Angulo (2000) apresenta uma correlação entre a massa específica e a taxa de absorção do agregado. O autor observou que os

agregados reciclados com alta taxa de absorção tendem a possuir uma massa específica baixa.

A Tabela 4.4 mostra os resultados de massa específica de pesquisas anteriores, o que indica a tendência de resultados inferiores para os agregados reciclados. Não obstante as diferenças na composição do resíduo, alguns trabalhos obtiveram o mesmo valor de massa específica do agregado reciclado.

Tabela 4.4 – Pesquisas com valores de massas específicas em agregados miúdos.

	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	
	<b>A.N</b>	<b>A.R</b>
Carneiro, 1999	2,67	2,59
Lima, 2005	2,63	2,50
Hood, 2006	2,62	2,37
Pedrozo, 2008	2,61	2,51
Corinaldesi et al., 2009b	2,59	2,29
Araújo, 2014	2,63	2,51
Martínez et al., 2016	2,60	2,09

De acordo com Bazuco (1999) os valores de massa específica dos agregados reciclados são de 5 a 10% menores que os valores apresentados pelos agregados naturais. Isto pode ser atribuído ao fato da quantidade de argamassa aderida às partículas de agregado reciclado, como também pode ser devido à origem e a granulometria do material. Conforme Hansen (1997), os valores de massa específica de agregados reciclados oscilam entre 2,12 kg/dm<sup>3</sup> a 2,70 kg/dm<sup>3</sup>, o que depende dos resíduos originários utilizados na britagem.

Os agregados reciclados com massa específica em torno de 2,50 g/cm<sup>3</sup> são predominantemente compostos de rochas naturais, envolvidas por uma camada de

pasta de cimento endurecida. Já os agregados com densidade entre 1,90 a 2,50 g/cm<sup>3</sup> são constituídos, geralmente, por material cerâmico (ANGULO, 2005)

Silva (2014) destaca a importância do controle da qualidade do agregado produzido nas usinas de beneficiamento para que seu uso se torne viável para a produção de concretos e argamassas. Outra propriedade destoante é a presença de material pulverulento nos agregados reciclados, que pode ser até cinco vezes maior do que nos agregados miúdos naturais (Pedrozo *et al.* 2008), superando os valores recomendados em norma. Conforme a norma de determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados (NBR 7219, 1982), os valores máximos de materiais passantes na peneira de abertura de 0,075mm é de 5%.

A elevada quantidade de partículas finas na mistura pode afetar a demanda de água de amassamento necessária, o que implica numa redução da resistência mecânica do concreto produzido, como, também, influencia na diminuição da resistência ao desgaste por abrasão (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2008). Esta característica pode influenciar negativamente o produto final, tanto pelo maior consumo de água quanto pela presença de argilominerais.

Miranda (2005) menciona que os agregados miúdos reciclados são compostos de uma parcela significativa de finos, que podem atingir até 30% da sua massa total. Nesta pesquisa, os agregados reciclados obtiveram 7% de partículas passantes na peneira #200, de modo que esta quantidade de pó pode afetar a ligação entre o agregado e a pasta, o que pode enfraquecer a zona de transição. O autor sugere a lavagem para a retirada dessa parcela de material pulverulento dos agregados reciclados, pois o teor de finos correlaciona-se diretamente com a absorção de água dos agregados, devido a maior área superficial dos materiais de menor granulometria. Com a redução dos finos, o fator água/cimento diminui o que pode influenciar na trabalhabilidade e melhorar as propriedades do estado endurecido do concreto.

A literatura afirma que até certo limite as partículas finas auxiliam no preenchimento dos vazios, e facilita o envolvimento da areia com o cimento. Entretanto, o excesso de finos demanda uma maior adição de água para a hidratação do cimento, de forma que esse fator aumenta a quantidade de vazios no concreto e causa redução da resistência mecânica e da durabilidade.

O inchamento da areia é o fenômeno de variação de volume aparente, provocado pela absorção de água livre pelos poros do agregado miúdo, o que influencia na massa unitária (ABNT NBR 6467, 2006). O coeficiente de inchamento é calculado pelo quociente entre os volumes úmido e seco de uma mesma massa de agregados. O inchamento se caracteriza pela expansão das partículas gerada pela água adsorvida. A umidade crítica é o valor máximo de teor de umidade, no qual o coeficiente se mantém constante.

Girardi (2016) explica que o inchamento dos agregados reciclados apresenta um comportamento diferente dos agregados naturais, pois ocorre um retardo no início do inchamento, até o teor de umidade atingir 5%, de forma que não há inchamento significativo. Este fato também ocorreu nesta pesquisa. Outro fato relevante que destoa dos agregados naturais é quando o teor de umidade atinge certo limite e começa a diminuir o volume, ao invés de aumentar. Nos resultados deste ensaio, a areia reciclada possui um menor coeficiente de inchamento quando comparada a areia natural.

Outra propriedade analisada foi o teor de matéria orgânica das amostras, o que pode interferir no processo de hidratação do cimento. Para este teste são elaboradas duas soluções, a padrão que é comparada com a outra, na qual mistura o agregado a uma solução de NaOH a 3%. As misturas são agitadas vigorosamente e colocadas em repouso sem contato com a luminosidade por 24 horas, para que ocorram as reações químicas necessárias. Após este período, o teor de matéria orgânica é analisado pela cor da solução, de modo que quanto mais escura estiver, maior será a quantidade impurezas orgânicas. As amostras apresentam um teor inofensivo de rejeitos orgânicos, pois a solução não foi mais escura que a cor amarela padrão.

Para os agregados graúdos também foram realizados ensaios tanto para os naturais e quanto para os reciclados conforme valores apresentados na Tabela 4.5.

Os agregados reciclados graúdos também apresentaram massa unitária e específica inferiores à dos agregados naturais. Uma das propriedades mais importantes dos agregados reciclados para seu uso em concreto é a absorção de água. Esta taxa afeta diretamente a relação água/cimento da mistura, como também interfere na trabalhabilidade do material, pois pode ocorrer uma sucção da água de amassamento por parte do agregado.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios físicos do agregado graúdo.

	<b>Brita Natural</b>	<b>Brita Reciclada</b>
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1,39	1,16
M. Específica agregado seco	2,61	2,06
M. Específica agregado saturado com superfície seca	2,63	2,23
M. Específica aparente	2,65	2,48
Material pulverulento	1%	4%
Impurezas orgânicas	Ausente	Ausente
Abrasão “Los Angeles”	25%	49%
Índice de forma pelo método do crivo	0,85	0,70
Índice de forma pelo método do paquímetro	1,86	2,05
Absorção de água	1%	8%

Neste trabalho, a taxa de absorção de água dos agregados reciclados graúdos foi de 8%, valor significativamente superior quando comparado aos agregados convencionais. Este fator pode ser atribuído pela camada de argamassa antiga aderida às partículas de agregados reciclados (LEVY, 1997; ZORDAN, 1997; BAZUCO, 1999). A elevada taxa de absorção de água dos agregados reciclados também pode ser atribuída a porosidade dos grãos, que influencia diretamente nas propriedades mecânicas e físicas do produto final (ULSEN, 2011).

Para a compensação da absorção de água do material reciclado, Devenny e Khalaf (1999) analisaram a imersão em água dos agregados reciclados por 24 horas antes da mistura. Esta condição saturada do agregado reciclado foi utilizada também nesta pesquisa.

Uma outra propriedade dos agregados graúdos é a resistência à abrasão Los Angeles, onde a análise do ensaio desta propriedade fornece um indicativo da

qualidade do material. Identifica-se a resistência à fragmentação por choque e atrito das partículas. Pedrozo (2008) ressalta que a resistência do agregado reciclado não será a mesma do material que o originou, pois devido ao processo de britagem ocorre o enfraquecimento do grão, o que causa o aparecimento de fissuras no agregado.

Conforme Levy (1997) os valores de abrasão Los Angeles para os agregados reciclados são de 20 a 50% superiores aos agregados convencionais. Neste trabalho, o resultado de abrasão para os agregados reciclados foi de 49%, valor semelhante aos encontrados por Bazuco (1999) e Carneiro *et al.* (2000), os mesmos determinaram uma perda por abrasão de 44,5% e 45%, respectivamente. A norma NBR NM 51 (2001) limita a perda por abrasão em massa de 50% para os agregados utilizados em concreto. O valor encontrado satisfaz os requisitos da norma, entretanto, se encontra muito próximo ao limite.

O índice de forma dos agregados graúdos foi realizado a partir de dois métodos: crivo e paquímetro. No método do crivo o índice de forma pode variar de 0,0 a 1,0. Quanto mais próximo ao valor 1, mais cúbico é o grão e valores aproximados de 0,0 mais lamelar é a partícula. O valor obtido para o índice de forma para o agregado natural foi maior do que para o agregado reciclado. Assim, identifica-se maior cubicidade nos agregados naturais. No entanto, os materiais apresentaram um índice de forma superior a 0,5, de modo que pode-se dizer que estes servem para uso em obras viárias.

Para normatizar a forma do agregado graúdo no seu uso em concretos a NBR 7809 (2008) recomenda a determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. O ensaio consiste na razão entre o comprimento e a espessura de 200 grãos. O resultado do ensaio não deve ser superior a 3,0. Quanto mais próximo do valor 1,0, mais cúbico é o agregado. Por este método, o agregado graúdo natural também se apresentou mais cúbico. Os grãos mais lamelares demandam uma maior necessidade de água, o que pode afetar na trabalhabilidade e na resistência das misturas.

#### 4.1.1.1 Análise granulométrica

As composições granulométricas da areia reciclada e natural são apresentadas na Figura 4.1. Pode-se observar grande afinidade entre as curvas, de forma que isto significa dizer que as areias são semelhantes quanto a forma com que os grãos estão distribuídos. É possível identificar que a areia reciclada se comporta de forma mais contínua, com os grãos se complementando, o que implica num maior empacotamento das partículas. Isto pode ser atribuído ao fato desta areia ser artificial, ocorrendo um controle nas peneiras para uma adequada distribuição granulométrica. A areia convencional se apresenta mais uniforme, com grãos do mesmo tamanho.

Carneiro (1999) afirma que a distribuição granulométrica influencia na compacidade da mistura. Quanto maior a compacidade, maiores valores de resistências mecânicas. Pela Figura 4.1 pode-se observar que a areia reciclada apresenta uma certa distribuição de tamanhos de grãos, o que pode vim a incrementar um ganho de resistência. O tamanho dos grãos influencia diretamente a massa unitária, o fator de empacotamento, o índice de vazios e a porosidade das partículas.

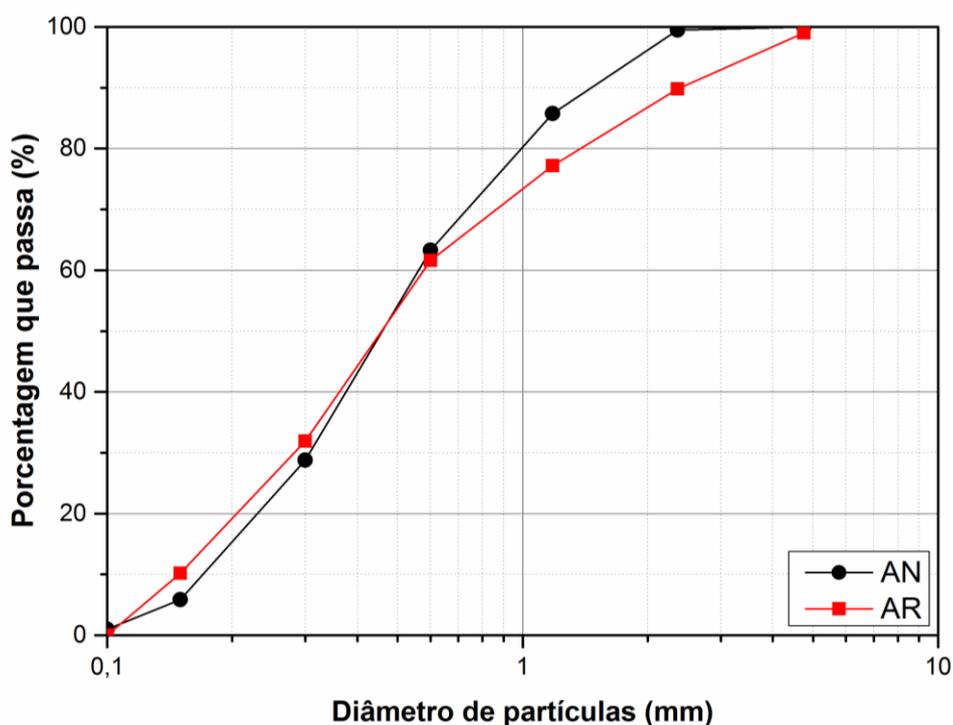


Figura 4.1 – Gráfico da distribuição granulométrica dos agregados miúdos.

A Figura 4.2 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados graúdos reciclados e naturais. Como nas curvas da areia, as composições granulométricas dos agregados graúdos também mostram certa semelhança, o que favorece a comparação dos agregados.

A distribuição granulométrica depende da composição do RCD, onde cada tipo de resíduo apresenta um comportamento na curva. Para Lima (1999) a granulometria dos reciclados varia conforme o tipo de resíduo processado, os equipamentos utilizados, a granulometria do resíduo antes de ser processado e outros fatores. Assim, a curva granulométrica é característica específica de cada tipo particular de resíduo reciclado.

No geral, os agregados reciclados apresentaram curvas bem graduadas, contínuas, o que implica num melhor arranjo entre as partículas. A granulometria afeta diretamente as propriedades como trabalhabilidade, resistência mecânica, absorção de água, consumo de aglomerantes, etc. (JOICHEM, 2012).

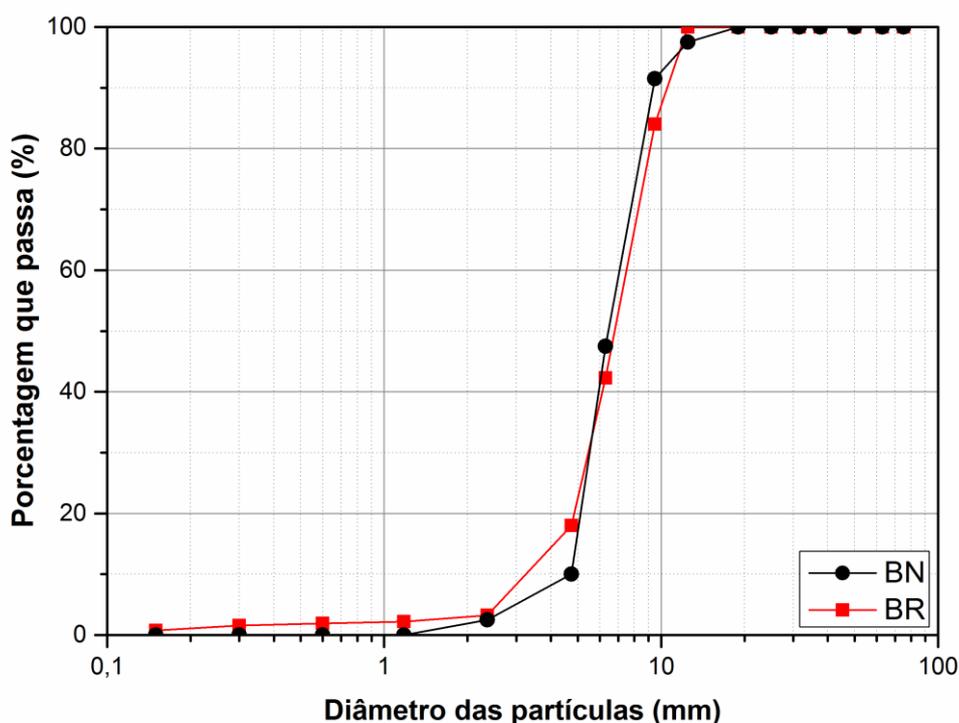


Figura 4.2 – Gráfico da distribuição granulométrica dos agregados graúdos.

Um parâmetro para melhor avaliar as curvas de distribuição granulométrica é o coeficiente de uniformidade ( $C_{un}$ ), definido pela Equação 1.

$$C_{un} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Onde:

$D_{60}$  – Diâmetro correspondente a 60% passante nas peneiras;

$D_{10}$  – Diâmetro correspondente a 10% passante nas peneiras.

Carneiro (1999) explica que quanto maior o seu valor, maior será a faixa de grãos e mais bem graduado é o agregado. As areias são classificadas como muito uniformes quando possuem  $C_{un} < 5$ , de uniformidade média quando  $5 < C_{un} < 15$ , e menos uniforme, quando  $C_{un} > 15$ . Os coeficientes de uniformidade das areias são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Coeficientes de uniformidade do agregado miúdo.

<b>Areias</b>	<b><math>C_{un}</math></b>
AN	3,23
AR	4,40

A partir desses coeficientes, as areias são classificadas como muito uniforme. No entanto, a areia reciclada apresentou um coeficiente maior, o que implica numa melhor distribuição de tamanho dos grãos.

#### **4.1.2 Caracterização química**

A Tabela 4.7 apresenta a composição química dos agregados, obtida pelo ensaio fluorescência de raios X (FRX). A análise química foi realizada pelo espectrômetro por fluorescência de raios X do tipo EDX-720, Shimadzu, em uma

atmosfera a vácuo e desenvolvido o método semi-quantitativo, no laboratório de engenharia dos Materiais na UFRN.

Foram analisadas cinco amostras diferentes, incluindo o cimento e a areia natural utilizados na confecção dos blocos. A areia reciclada mista e as frações segregadas do RCD de material cinza e vermelho. Esta análise corrobora com as porcentagens da composição do RCD encontradas na pesquisa, pois a fração cinza se assemelha com RCD na quantidade de elementos. Assim, pode-se identificar que a maior parte do RCD trabalhado é composto por resto cimentícios de concretos, argamassas e rochas.

Tabela 4.7 – FRX dos materiais utilizados na pesquisa.

<b>Composição Química</b>	<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>RCD</b>	<b>Cinza</b>	<b>Vermelho</b>
SiO <sub>2</sub>	14,71%	65,50%	40,40%	38,33%	42,57%
CaO	68,68%	4,65%	29,80%	32,20%	4,09%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,41%	12,10%	10,18%	10,10%	19,40%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,35%	8,99%	8,90%	9,48%	24,60%
MgO	2,70%	0,80%	0,77%	0,83%	2,52%
SO <sub>3</sub>	5,48%	-	5,10%	1,40%	0,22%
K <sub>2</sub> O	1,26%	3,51%	1,60%	3,39%	3,09%
TiO <sub>2</sub>	0,33%	0,82%	0,96%	0,67%	1,58%
SrO	0,05%	2,32%	1,20%	2,50%	0,60%

Os agregados reciclados são constituídos de restos de todos os materiais e componentes utilizados na construção civil, como brita, areia, materiais cerâmicos, argamassas, concretos, etc. Dessa forma, sua composição química depende da estrutura de cada um desses constituintes, apresentando uma maior variedade de componentes químicos em função dos materiais que os originaram.

A partir do FRX, pode-se identificar que os maiores teores de óxidos encontrados tanto para a areia natural quanto para os agregados reciclados analisados (misto, cinza e vermelho) foram o óxido de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Entretanto, em porcentagens diferentes.

O agregado reciclado possui menor teor de  $\text{SiO}_2$  (sílica) do que areia natural, o que caracteriza o agregado convencional com uma quantidade elevada de quartzo, em comparação com os demais óxidos. O alto teor de óxido de cálcio na composição dos resíduos pode ser atribuído pela presença de compostos cimentícios hidratados, o que também foi observado por Jochem (2012). Isto também pode influenciar na atividade pozolânica do material, o que condiz com os melhores desempenhos obtidos na resistência mecânica em concretos com substituição da areia reciclada. O óxido de cálcio possui propriedades ligantes o que pode favorecer nas ligações da mistura (SILVA, 2014).

Os resultados encontrados por Silva (2014) foram os que mais se assemelharam aos valores encontrados no FRX desta pesquisa, como mostra a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Comparação dos resultados de FRX do agregado reciclado de pesquisas anteriores.

Florescência de raios X do AR			
	<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>\text{CaO}</math></b>
Limbachiya et al., 2007	65,37%	5,37%	13,93%
Silva, 2014	46,60%	12,00%	30,30%
Araújo, 2014	44,47%	19,97%	-
Silva, 2014	67,00%	6,30%	11,54%

A origem dos elementos químicos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dos agregados reciclados está vinculada aos diversos tipos de silicatos, provenientes das partículas de pasta de cimento endurecida e de agregados naturais, rochas naturais, cerâmica

vermelha, etc. (ANGULO, 2005). Dessa forma, observa-se que existe uma grande variabilidade de óxidos no RCD e que sua quantidade varia em função dos seus componentes, diferentemente dos agregados naturais. Esses resultados corroboram com estudos anteriores que analisaram os agregados reciclados (TOLEDO *et al.*, 2007; LIMBACHIYA *et al.* 2007; STEFANIDOU *et al.*,2014).

Assim, a análise química dos materiais utilizados na pesquisa apresenta valores compatíveis com os obtidos em trabalhos anteriores. A composição química do RCD corresponde aos materiais originais como concretos, argamassas e produtos cerâmicos. Os constituintes majoritários do agregado reciclado foram o quartzo, óxido de cálcio, seguido dos óxidos de alumínio, ferro e magnésio, isto pode ser explicado pela presença de argamassa aderida aos grãos (ÂNGULO, 2005).

#### **4.1.3 Caracterização mineralógica**

A análise mineralógica do agregado reciclado foi realizada a partir do ensaio de difração de raio X, que determina a fase cristalina dos materiais e analisa os hidratos mal cristalizados (SILVA, 2014). O equipamento utilizado foi de marca Shimadzu modelo XRD – 7000, instalado no Laboratório de engenharia de Materiais da UFRN. As amostras com granulometria inferior a 0,15mm foram submetidas ao ensaio, utilizando-se radiação Cu – K $\alpha$ , com tensão acelerada 40 kV e corrente de 30 mA, com varredura de 2 $\theta$  de 5° a 80° e velocidade de 5°/min.

O difratograma (Figura 4.3) aponta fases cristalinas de quartzo (SiO<sub>2</sub>) e calcita (CaCO<sub>3</sub>) representados pelos picos agudos, onde estes minerais são oriundos de rochas naturais, de restos de cimento endurecidos e argamassas aderidas na superfície de partículas de RCD ou devido ao processo de carbonatação dentro do concreto original (PEDROZO, 2008).

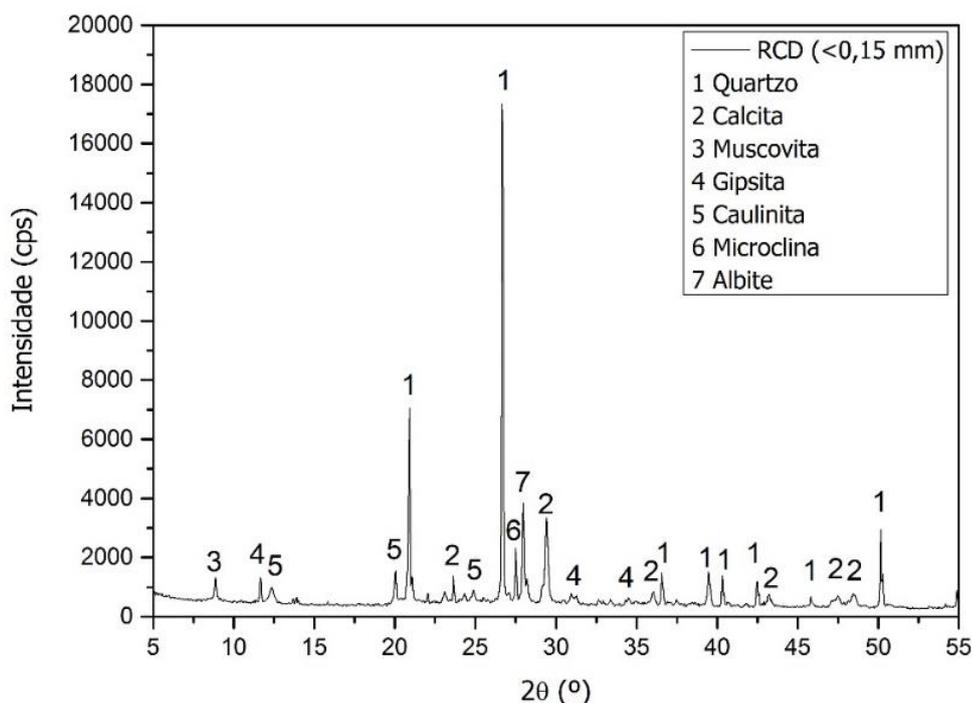


Figura 4.3 – Difratoograma de raio X do agregado reciclado.

Outros minerais também foram identificados no difratograma: muscovita, gipsita, caulinita, microclima e albite. Angulo *et al.* (2009) atribui a presença de muscovita a pedras de granito ou cerâmicas de barro vermelho. A gipsita e a caulinita são provenientes de produtos cerâmicos, entretanto, em menor intensidade, corroborando com o fato da composição do RCD trabalhado ser, em sua maioria, constituído de fração cinza, uma vez que os minerais e elementos químicos provenientes de materiais cerâmicos são em pouca quantidade.

Bianchini *et al.* (2005) analisaram as composições mineralógicas dos agregados reciclados oriundos de construção e demolição e identificaram quantidades de quartzo, calcita, dolomita, feldspato, muscovita e menores quantidades de hidróxidos de cálcio e silicatos hidratados. Os minerais detectados por Ferreira *et al.* (2015) foram principalmente quartzo, feldspato e calcita.

Pedrozo (2008) encontrou a predominância de quartzo, calcita, ilita e hematita. A presença de ilita está atribuída ao fato da presença de materiais cerâmicos, enquanto que a calcita é devido à presença de materiais cimentícios na composição dos agregados reciclados. O autor também destacou que a presença de caulinita nos

agregados miúdos reciclados é um indicativo na característica das argilas utilizadas como pozolanas.

Limbachiya *et al.* (2007) observaram uma concentração de picos de  $\text{SiO}_2$ , e picos menores de feldspato e calcita. Os autores explicitaram que a presença de feldspato pode estar atribuída a fração cerâmica do RCD, que é caracterizada como uma fase alumino-silicato.

O estudo da composição mineralógica do RCD corrobora com os resultados encontrados na composição química, pois foi confirmada a presença de quartzo e calcita. Os elementos químicos, geralmente, encontramos na areia natural são o quartzo, albite e feldspato.

#### 4.1.4 Caracterização microscópica

Para a análise micro estrutural foi realizado o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As micrografias foram obtidas em equipamento da marca Hitachi modelo TM-3000.MEV. Foram analisadas quatro amostras: areia natural (Figura 4.4), areia reciclada (Figura 4.5), frações cinza (Figura 4.6) e vermelha (Figura 4.7).

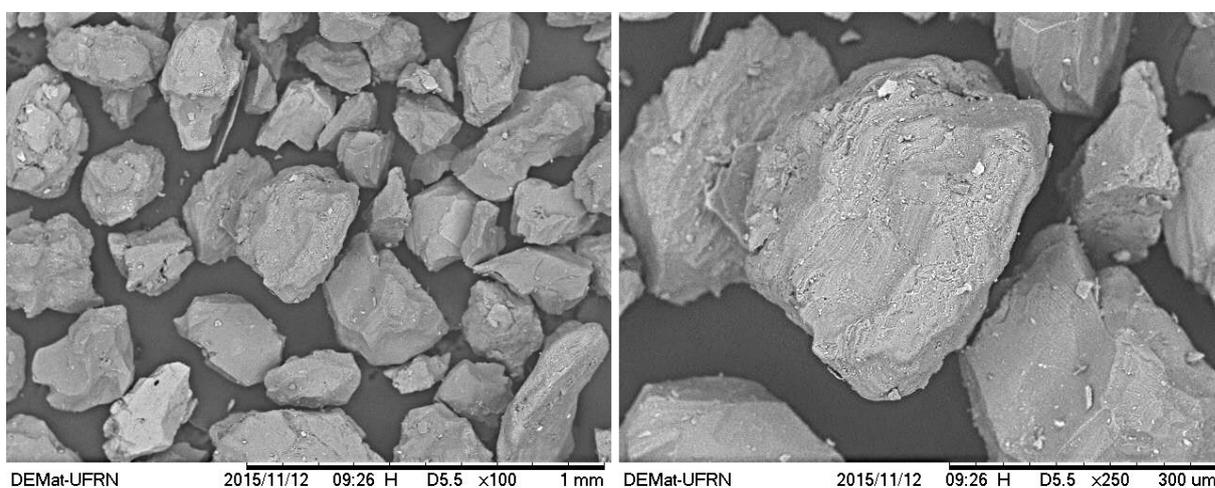


Figura 4.4 – Forma e textura superficial da areia natural.

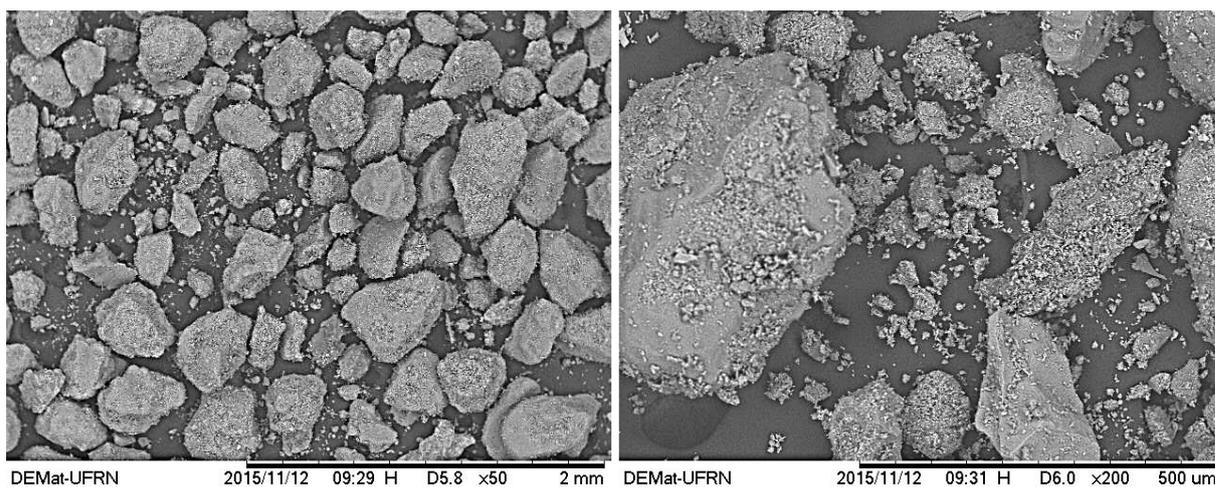


Figura 4.5. – Forma e textura superficial da areia reciclada mista.

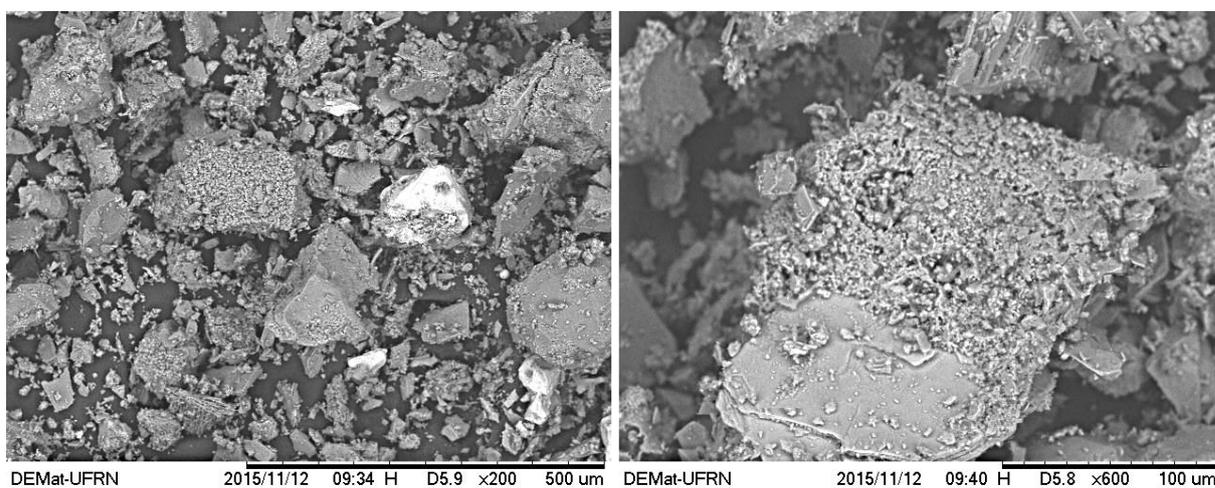


Figura 4.6 – Forma e textura superficial da areia reciclada da fração cinza.

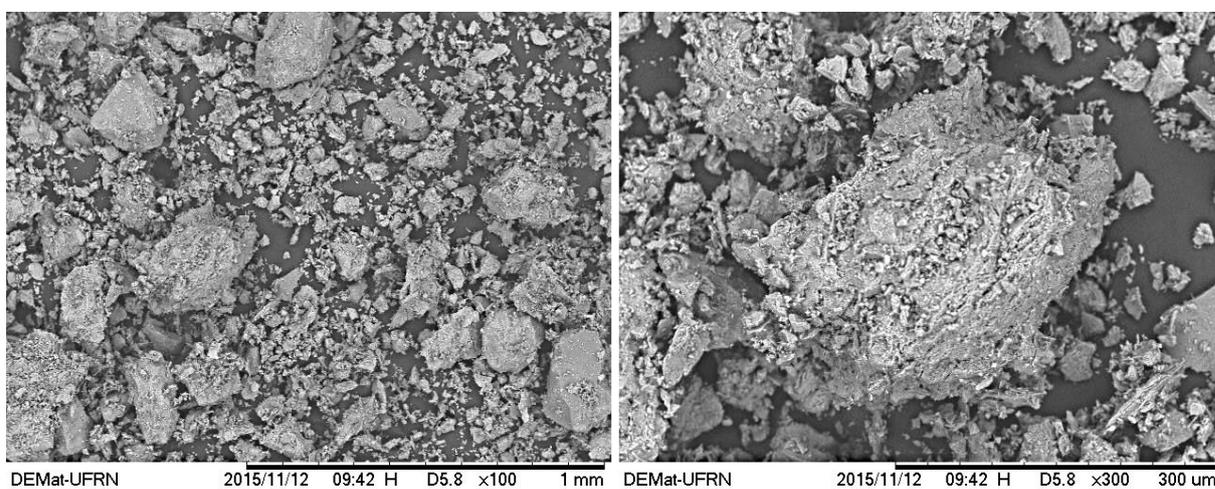


Figura 4.7 – Forma e textura superficial da areia reciclada da fração vermelha.

A partir das imagens pode-se observar o formato, tamanho e textura superficial das partículas. Os grãos de agregados naturais se apresentam de forma esférica, arredondados, com superfície lisa, polida, já os agregados reciclados possuem arestas e vértices, isto é atribuído a britagem, com textura áspera e rugosa. Os agregados reciclados tendem a ser um pouco mais angular do que os agregados naturais. Estas análises também foram observadas em estudos anteriores (ZORDAN, 1997; BAZUCO, 1999; PEDROZO, 2008; JOCHEM, 2012; BEHERA *et al.*, 2014).

A superfície porosa e rugosa dos grãos dos agregados reciclados pode ser atribuída à argamassa antiga aderida ao agregado original (Fig. 4.6) ou ao alto teor de material pulverulento (Fig. 4.7), o que afeta a ligação entre o agregado e a matriz cimentícia. Conforme as imagens da fração vermelha percebe-se uma maior variação de tamanho entre os resíduos cerâmicos, isto aumenta a quantidade de pó nos agregados reciclados.

O formato e a textura dos agregados reciclados dependem do tipo e nível de britagem. A forma das partículas interfere nas propriedades do concreto, como a trabalhabilidade, compacidade, ângulo de atrito interno e quantidade de água de amassamento necessária à mistura (NEVILLE, 1997). Os agregados reciclados por serem britados apresentam uma maior relação superfície/volume quando comparados aos naturais, assim os grãos requerem mais argamassa para obter uma boa trabalhabilidade. Em geral, o grão do agregado reciclado apresenta uma forma mais irregular e uma textura superficial mais áspera e porosa (ANGULO, 2000).

O consumo de água está vinculado à forma das partículas. Como pode ser observado, os agregados naturais possuem forma esférica que promovem um melhor rolamento dos grãos, e em comparação aos agregados reciclados que além de possuir partículas ásperas e porosas, apresentam um alto teor de material pulverulento, o que demanda mais água para lubrificar os grãos. A Figura 4.5 apresenta os grãos do agregado reciclado, onde observa-se que os mesmos não possuem forma definida e apresenta superfície angular com arestas, o que é corroborado por Araújo (2014).

Os agregados com superfície áspera apresentam maior absorção de água do que os agregados de superfície lisa (MEHTA; MONTERO, 2008). Na Figura 4.5 percebe-se que os agregados reciclados são mais irregulares, com superfície porosa

e textura áspera. Devido às estas características torna-se necessário uma maior quantidade de pasta de cimento para envolver os grãos, o que pode aumentar o consumo de cimento ou a relação água/cimento.

O formato dos agregados reciclados favorece a ligação entre a pasta e o agregado, devido à rugosidade de sua superfície. Esta aderência não ocorre com os agregados convencionais por estes apresentarem textura lisa. A forma e a textura superficial dos agregados afetam significativamente a resistência do concreto, o agregado com textura mais áspera resulta numa melhor aderência entre as partículas e a matriz cimentícia.

Os grãos da fração cinza, que representa restos de resíduos cimentícios, são apresentados na Figura 4.6. Pelas micrografias é possível perceber a argamassa antiga aderida aos grãos. Não obstante a isso, os agregados reciclados provenientes da parcela cinza apresentam melhores desempenhos mecânicos do que os agregados oriundos da fração vermelha (KWAN *et al.*, 2011). Isto pode ser atribuído às propriedades de “autocimentação” do cimento, partículas cimentícias que ainda não foram hidratadas.

Xiao *et al.* (2015) destaca que concretos com uso de agregados reciclados resultam numa matriz cimentícia com diferentes zonas de transição interfacial, pois além do agregado e da pasta, inclui a argamassa antiga aderida, o que pode ser um fator crucial no produto final.

Na Figura 4.7 pode-se observar os grãos da fração vermelha do RCD oriundos de materiais cerâmicos. Fica evidente a elevada porosidade e aparência quebradiça das partículas, o que contribui para aumentar a absorção de água dos agregados reciclados. A porosidade dos grãos e a elevada área superficial estão relacionadas com uma maior demanda de água e altos índices de absorção. A porosidade, a forma e a textura dos grãos afetam as propriedades do concreto, incluindo a resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O tamanho e o formato das partículas influenciam na zona de transição na interface pasta-agregado (ZTI). Quando os agregados são alongados/achatados e grandes, maior é a tendência de acúmulo de filme de água junto a superfície, o que enfraquece a ZTI. Assim, os agregados maiores tendem a formar uma ZTI mais fraca, contendo microfissuras.

## 4.2 CORPOS DE PROVA NA DOSAGEM EXPERIMENTAL

### 4.2.1 Resistência mecânica

Na fase experimental da pesquisa a dosagem e as condições dos agregados na mistura foram testadas em corpos de provas, moldados em laboratório da maneira convencional, sem a máquina de vibro-prensagem. Para cada amostra foram moldados seis corpos de prova e ensaiado aos 28 dias a resistência à compressão simples. A Figura 4.8 apresenta os resultados deste ensaio.

As misturas com areia reciclada saturada não obtiveram resultados de resistência mecânica satisfatórios como também durante a moldagem apresentaram uma consistência muito fluida. Para os blocos de pavimentação a relação água/cimento precisa ser baixa, e, para esta situação, tais amostras foram descartadas para a confecção dos blocos.

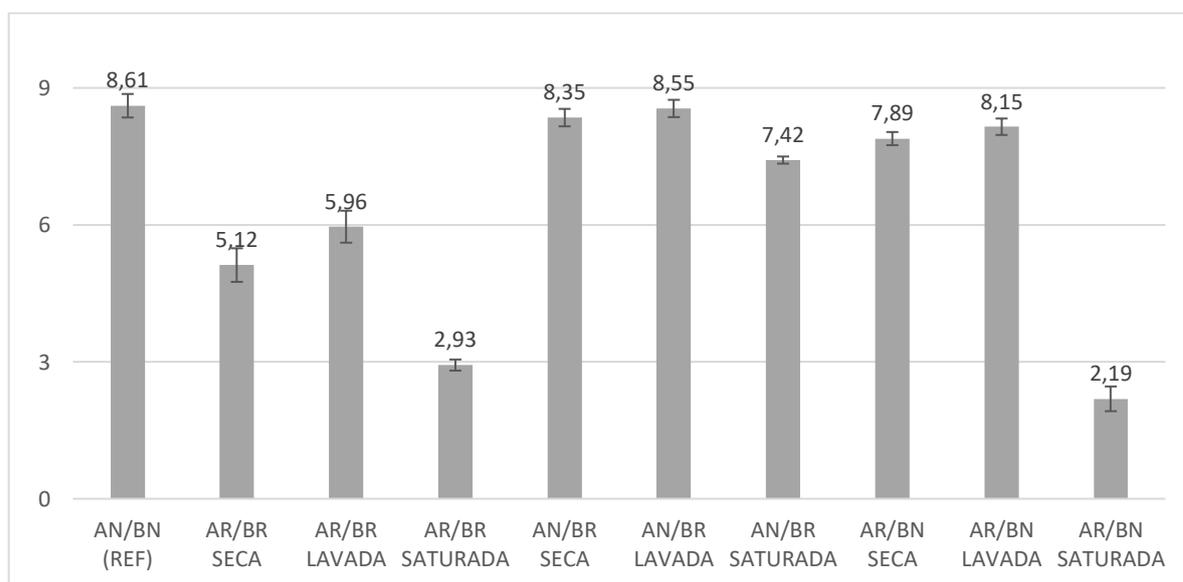


Figura 4.8 – Gráfico da resistência à compressão simples dos corpos de prova.

As resistências à compressão simples das amostras compostas somente por um tipo de agregado reciclado apresentaram melhores desempenhos. Os concretos feitos com agregado graúdo reciclado e areia natural obtiveram resistências

semelhantes ao concreto de referência, como também os concretos com areia reciclada e agregado graúdo natural mostraram-se mais resistentes do que os agregados reciclados juntos na mesma mistura.

Os corpos de prova produzidos com o agregado reciclado lavado apresentaram melhor desempenho mecânico quando comparado aos concretos moldados com agregados reciclados sem beneficiamento.

### **4.3 BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO**

#### **4.3.1 Estado fresco**

Durante a fabricação dos blocos algumas amostras se destacaram pelo seu comportamento no estado fresco. As amostras com agregados reciclados secos, sem nenhum beneficiamento, introduzidos como chegaram diretamente da usina, mostraram uma textura falha. A brita reciclada não teve muita aderência a mistura, isto pode ser atribuído ao elevado teor de material pulverulento. Os blocos confeccionados com o agregado reciclado graúdo seco obtiveram dificuldades na prensagem, e suas dimensões resultaram maiores que os demais, enquanto que os blocos com o agregado reciclado graúdo lavado apresentaram textura lisa e bem acabada.

Sengel e Topçu (2004) ressaltam que a trabalhabilidade do concreto com agregados reciclados para uma mesma razão água/cimento é menor, especialmente quando a substituição excede a 50%. Uma das soluções propostas pelos autores a fim de melhorar a trabalhabilidade é alterar o estado de umidade dos agregados reciclados antes da mistura, como forma de reduzir a absorção de água. Nesta pesquisa a condição saturada da brita não reduziu a água do traço, de acordo com a trabalhabilidade do concreto.

As amostras com areia reciclada lavada apresentaram melhor trabalhabilidade e melhor aspecto visual do produto final. Isto pode ser explicado pelo fato do material pulverulento demandar mais água para lubrificar os grãos. O fato da areia lavada estar sem finos, fez com que a quantidade de água necessária para estas misturas fosse suficiente para promover um bom desempenho no estado fresco.

A trabalhabilidade da mistura é influenciada pela textura, formato e tamanho dos grãos com também pela quantidade de finos. A quantidade de água precisa ser eficiente para a hidratação do cimento e lubrificação dos agregados.

Para Angelim *et al.* (2003) as adições de elevados teores de diferentes finos mostram que a quantidade de água aumenta para uma substituição entre 30 a 40% de finos. Estudos de Hoque *et al.* (2013) com substituição de 25 e 50% de finos também resultou numa maior demanda de água para a consistência requerida. No entanto, nesta pesquisa fixou-se o teor de água para todas as misturas.

No estado fresco, o concreto com incorporação de agregados reciclados apresenta maior retenção de água, o que implica num impedimento de uma rápida perda de água. Isto pode favorecer as reações de hidratação do cimento e consequentemente, contribuir para as resistências mecânicas. Um problema prevenido pela retenção de água no estado fresco é evitar que esta rápida perda de água implique numa má hidratação do cimento (BRAGA *et al.*, 2014). Esta perda de água da mistura contribui para uma diminuição na resistência.

#### **4.3.2 Absorção de água**

Para a análise de absorção de água foram realizados dois ensaios conforme as normas NBR 9781 (Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio) e NBR 9778 (Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica).

Segundo a norma de peças de concretos para pavimentação, NBR 9781, a propriedade de absorção de água deve obter resultados médios menores ou iguais a 6%, não sendo admitido valores superiores a 7%. A Figura 4.9 apresenta os valores da taxa de absorção dos blocos aos 28 e 270 dias.

A amostra que representou as menores taxas de absorção foi a mistura com areia reciclada seca e brita natural. A areia reciclada com alto teor de material pulverulento pode ter causado no concreto um melhor empacotamento dos grãos, favorecendo a compacidade do bloco e dificultando a passagem da água. A granulometria mais contínua da areia reciclada pode ter influenciado numa menor taxa de absorção de água.

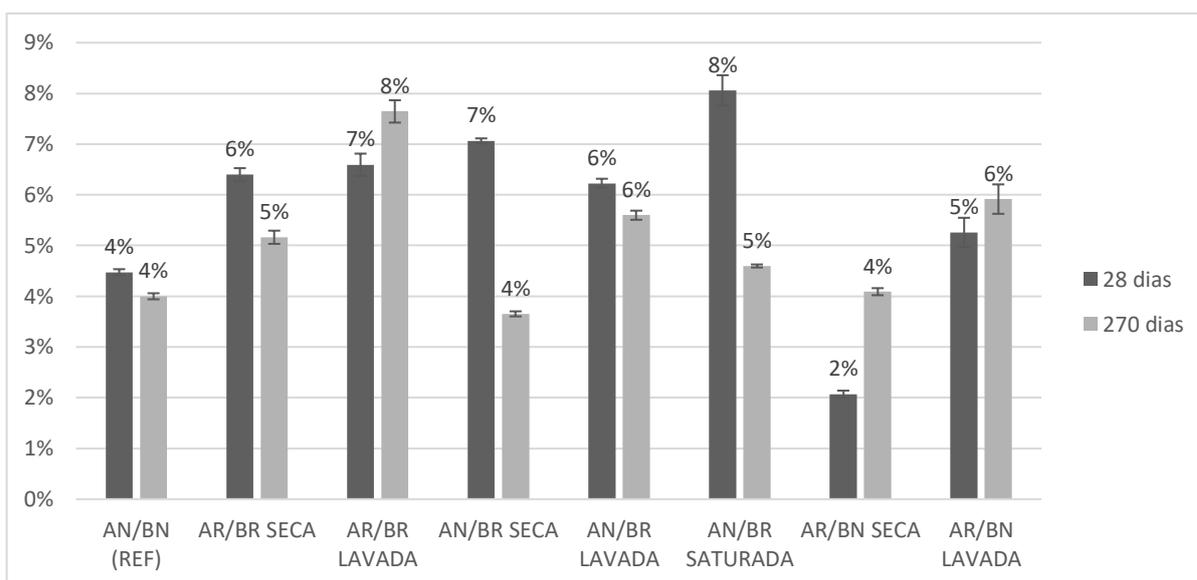


Figura 4.9 – Absorção dos blocos aos 28 e 270 dias.

De acordo com Dal Molin *et al.* (2004) uma maior quantidade de finos contribui para um efeito de compactação da mistura, de modo a propiciar um maior fechamento de vazios. Como o agregado reciclado possui maior absorção promove uma maior aderência entre a pasta e o agregado, através da absorção da pasta e da precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado.

Aos 28 dias, com exceção do bloco com areia natural e brita reciclada saturada, todas as amostras atenderam os requisitos da norma, obtendo a taxa de absorção menor que 7%. Uma justificativa para que o bloco confeccionado com brita reciclada saturada superasse o valor estipulado em norma pode ser atribuído ao fato de quando saturadas as partículas quebrem suas ligações e se desfaçam, enfraquecendo o concreto.

Aos 270 dias, a única amostra que não atendeu tal requisito foi o bloco com areia e brita recicladas lavadas. A maioria das misturas com areia reciclada teve a tendência de aumentar a taxa de absorção de água. O ensaio de absorção de água não é exigido aos 270 dias, entretanto, foi realizado este procedimento para verificar possíveis alterações nos blocos.

O outro ensaio de absorção de acordo com a NBR 9778 fornece também os resultados de índice de vazios e massa específica, como pode ser observado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de absorção de água pela NBR 9778.

<b>Amostras</b>	<b>Absorção</b>	<b>Índice de vazios</b>	<b>Massa específica seca</b>	<b>Massa específica saturada</b>	<b>Massa específica real</b>
AN/BN (REF)	5%	10%	2,13	2,23	2,37
AR/BR sec	7%	13%	1,91	2,04	2,19
AR/BR lav	8%	16%	1,99	2,15	2,37
AN/BR sec	11%	21%	1,95	2,15	2,45
AN/BR lav	5%	11%	2,08	2,20	2,35
AN/BR sat	12%	23%	1,95	2,19	2,55
AR/BN sec	6%	12%	2,05	2,17	2,34
AR/BN lav	7%	13%	1,99	2,12	2,29

A absorção dos agregados, a porosidade e a permeabilidade dos agregados afetam a aderência entre eles e a pasta de cimento. Estas propriedades dos agregados refletem também na resistência à abrasão e massa específica do concreto, conforme Neville (1997). Segundo o autor, os poros dos agregados possuem diferentes dimensões, e podem ser internos ou conectados a superfície da partícula, de forma a auxiliar a penetração da água. Vale ressaltar que a porosidade dos agregados contribui diretamente para a porosidade total do concreto.

A elevada taxa de absorção de água dos blocos com uso de agregados reciclados pode ser atribuída a taxa de absorção de água dos agregados reciclados que é maior quando comparada aos agregados naturais (ZORDAN, 1997; LEVY, 1997; LEITE, 2001).

O bloco de referência apresentou o menor volume de vazios, e conseqüentemente, a maior massa específica seca e saturada. Os blocos com areia natural e brita reciclada seca e saturada apresentaram uma alta taxa de absorção como também altos índices de vazios. No entanto, o bloco com areia natural e brita reciclada lavada obteve a mesma taxa de absorção do bloco de referência. Destaca-se que o procedimento de lavagem alterou a taxa de absorção do bloco com agregado reciclado graúdo.

Os blocos produzidos com areia reciclada apresentaram absorção de água semelhante ao bloco com agregados naturais. No que diz respeito aos blocos com areia reciclada lavada, observou-se que os mesmos obtiveram resultados de absorção maiores do que os blocos com areia reciclada seca.

### 4.3.3 Resistência à compressão

De acordo com o trabalho de Dal Molin *et al.* (2004) quanto maior a substituição de agregado miúdo reciclado no concreto, maiores resistências mecânicas foram obtidas. As características de textura e granulometria dos grãos influenciam no ganho do desempenho mecânico. A Figura 4.10 apresenta os valores obtidos na resistência à compressão de todos os blocos. A melhor resistência mecânica aos 270 dias foi a amostra confeccionada com areia reciclada lavada e brita natural.

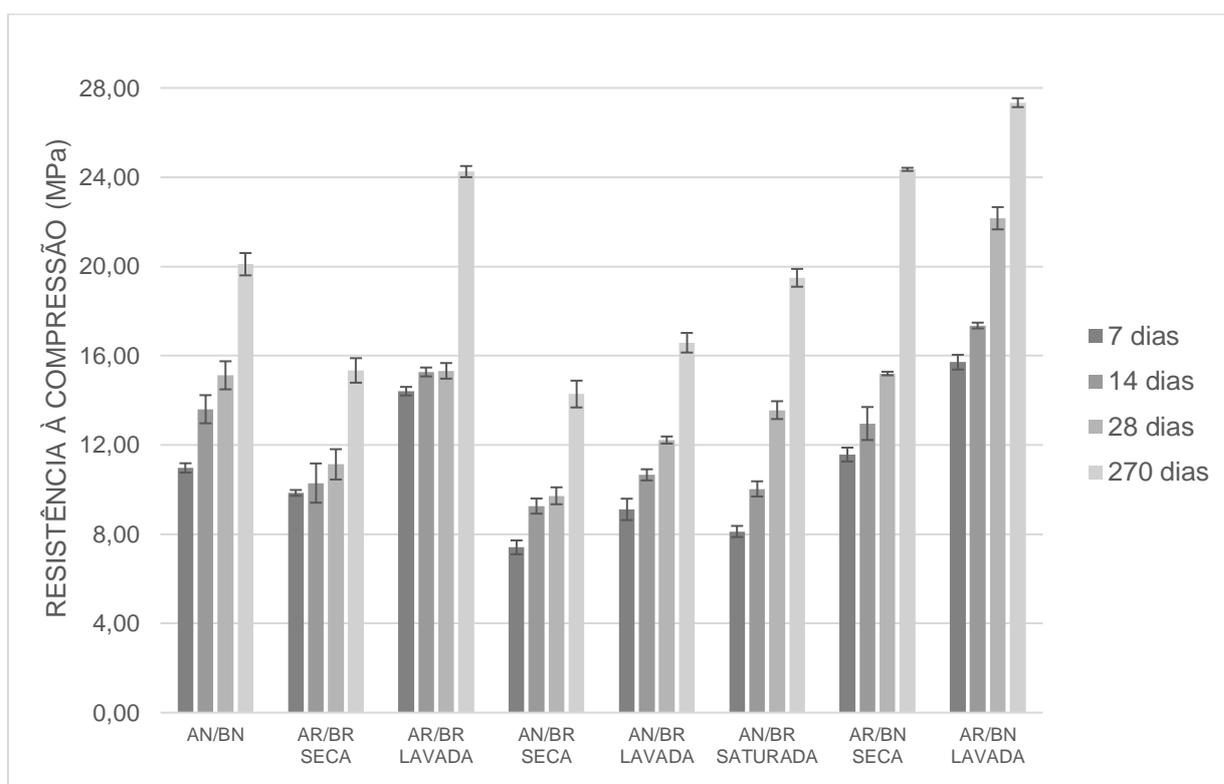


Figura 4.10 – Resistência à compressão aos 7, 14, 28 e 270 dias.

Os resultados de resistência mecânica obtidos nesta pesquisa não atingiram o valor mínimo recomendado em norma. No entanto, todas as amostras foram

confeccionadas segundo o mesmo padrão. Assim, pode ser feita a comparação entre os blocos. A deficiência no desempenho mecânico dos blocos produzidos pode ser atribuída ao traço ou ao processo construtivo.

No geral, as amostras contendo areia reciclada mostraram melhores desempenhos mecânicos. Resultados como este, também foram encontrados por Dal Molin *et al.* (2004). Houve um aumento de resistência para o traço com 100% de areia reciclada e 0% de brita reciclada. Este bom desempenho também pode ser atribuído a um fator de ordem química, devido a um possível efeito pozolânico do material finamente moído.

Leite (2001) também constatou que as amostras com agregados reciclados miúdos apresentaram índices de atividade pozolânica, o que pode estar associado ao ganho de resistência à compressão nos concretos com elevadas porcentagens de substituição de areia em idades avançadas.

Nos estudos de Pedrozo (2008) os concretos com baixa relação a/c e elevados teores de substituição do agregado miúdo também obtiveram melhores desempenhos mecânicos do que a amostra de referência. O autor atribui estes resultados ao fato do efeito fíler causado pelos finos presentes nas misturas. Khatib (2005) verificou o incremento da resistência à compressão dos 28 aos 90 dias nos concretos com agregado reciclado miúdo, e justifica este fato também pela possível atividade pozolânica dos finos.

Cabral *et al.* (2010) verificaram que a utilização do agregado reciclado miúdo incrementou a resistência à compressão do concreto, as possíveis razões para este efeito foram as reações pozolânicas, que melhoram a zona de transição interfacial da matriz, a rugosidade das partículas, reforçando as ligações entre a pasta de cimento e os agregados, e a água absorvida pelos grãos pode se apresentar disponível para contínua hidratação do cimento. Estes resultados também foram apontados por Corinaldesi e Moriconi (2009b), Evangelista e Brito (2010) e Laserna e Montero (2016).

No geral, as resistências mecânicas apresentam melhorias significativas com incorporação de finos, devido tanto ao efeito fíler, isto é, um preenchimento de vazios pelas partículas muito finas, de forma a permitir um aumento da compacidade do concreto, quanto a redução da razão água/cimento. Além disso tem-se a hipótese de

um possível efeito pozolânico dos finos que favorece a hidratação do cimento. Braga *et al.* (2014) apontam que com a substituição de finos de resíduos de construção e demolição, além do efeito fíler, ocorre o efeito hidráulico ligado ao cimento não hidratado no material reciclado. Assim, a resistência pode depender do tipo de finos e da quantidade de substituição.

É oportuno destacar também que o agregado reciclado miúdo possibilita um maior fechamento de vazios devido a sua granulometria. Isto proporciona uma maior compacidade do concreto, contribuindo para o incremento da resistência, como, também, devido à alta absorção e textura dos grãos, pode-se condicionar a uma maior aderência entre a pasta e as partículas, melhorando o desempenho mecânico das amostras.

Os blocos confeccionados com britas recicladas obtiveram as menores resistências, diferentemente dos resultados obtidos dos corpos de prova na fase experimental de dosagem (Figura 4.8). Como os blocos de pavimentação requerem baixa relação de água/cimento, o agregado reciclado graúdo pode ser um fator limitante na resistência, devido a sua baixa resistência (DAL MOLIN *et al.*, 2004). Nos estudos realizados por Zodan (1997) também se encontrou aspectos negativos para a resistência a compressão quando a substituição no concreto era apenas da fração graúda reciclada.

Outra característica de concretos com baixo fator água/cimento é a dificuldade de trabalhabilidade. Precisa-se levar em consideração que os agregados reciclados podem absorver parte da água de amassamento. Então, o decréscimo de resistência das amostras com agregado reciclado graúdo pode ser atribuído ao fator de relação água/cimento, a alta taxa de absorção dos agregados e a menor densidade.

Para Girardi (2016) a relação cimento/materiais secos não significa um fator decisivo na resistência à compressão, as propriedades como compacidade da mistura e empacotamento entre as partículas possuem mais influência no desempenho mecânico.

Na Figura 4.11 é possível observar a evolução do ganho da resistência à compressão ao longo dos 28 dias. A amostra AR/BN lavada que obteve a maior resistência à compressão, também representou o maior ganho ao longo dos 28 dias.

Esse ganho de resistência em idades posteriores pode ser atribuído ao tipo de cimento utilizado na pesquisa.

As razões para uma maior resistência à compressão dos concretos feitos com agregados reciclados miúdos são: a maior área superficial, o teor de finos e as reações químicas. Os agregados reciclados possuem uma maior área superficial em relação aos agregados convencionais, devido a uma superfície mais irregular e porosa. Por consequência deste atributo, o agregado reciclado proporciona um fortalecimento da zona de transição interfacial entre a matriz cimentícia e os agregados. Este fato melhora a aderência da pasta, por esta penetrar nos poros e aumentar a força da ligação.

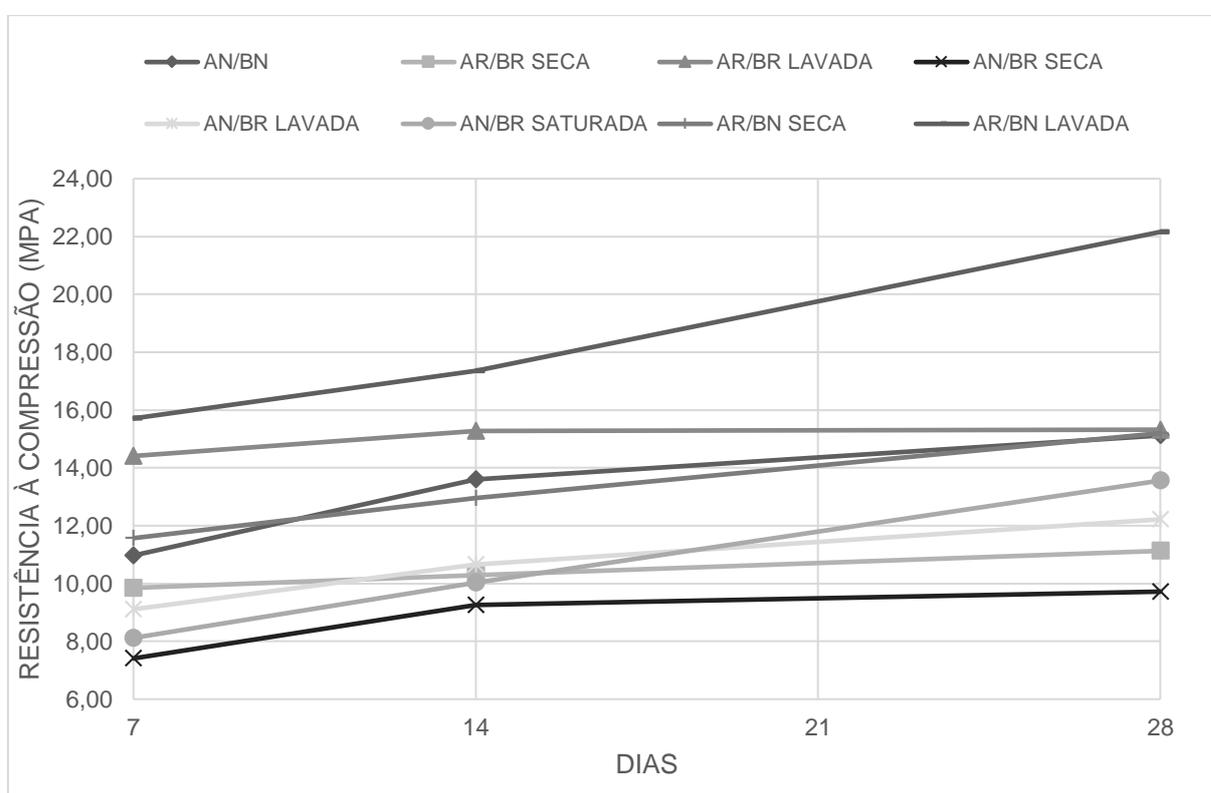


Figura 4.11 – Evolução da resistência à compressão desde 7 aos 28 dias.

Uma adequada quantidade de finos nos agregados reciclados propicia um efeito de micro enchimento, o que aumenta a compacidade do concreto. Por decorrência disto, a resistência à compressão possui melhor desempenho. As reações químicas que podem ocorrer entre as partículas não hidratadas de cimento existentes

no agregado reciclado pode favorecer o ganho de resistência mecânica, como também as possíveis reações pozolânicas entre o alto teor de alumina, sílica e hidróxido de cálcio do cimento hidratado. A Figura 4.12 apresenta as resistências à compressão dos blocos aos 28 dias.

A partir dos resultados obtidos e corroborados por outros autores (DAL MOLIN *et al.*; 2004; BRITO *et al.*, 2015) evidencia-se que o uso de agregados reciclados no concreto, com dosagens adequadas, não afeta significativamente a resistência à compressão. No entanto, é essencial considerar a caracterização e tratamento dos agregados reciclado. Leite (2001) constatou que o uso de agregado reciclado em concreto em substituição do agregado natural, principalmente para baixas relações água/cimento é viável.

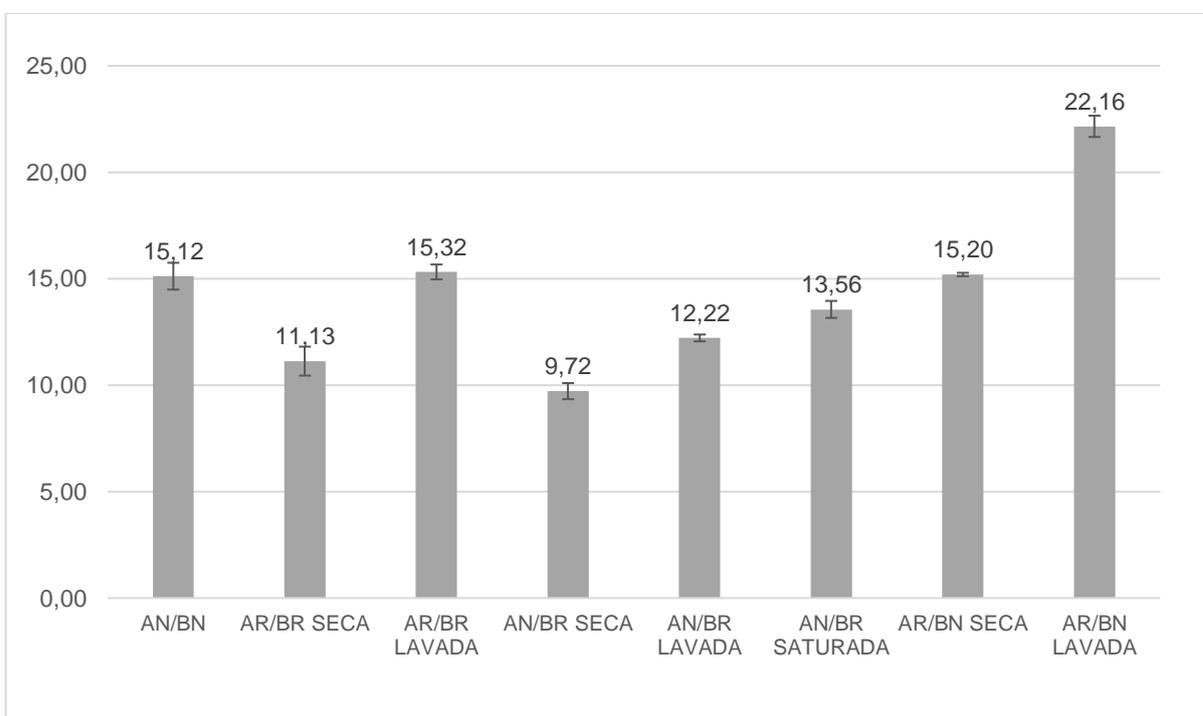


Figura 4.12 – Resistência à compressão aos 28 dias.

A composição do RCD apresenta elevados teores de restos de produtos cimentícios e materiais cerâmicos. Segundo Pedrozo (2008) estes materiais podem apresentar características que melhorem as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com o agregado reciclado miúdo.

Pedrozo (2008) observou também que para os concretos com agregados reciclados graúdos houve uma redução na resistência à compressão com o aumento do teor de substituição em relação à amostra de referência. Poon *et al.* (2006) encontraram também uma redução na resistência com a substituição de 100% dos agregados reciclados graúdos. O comportamento dos concretos com agregado reciclado depende do consumo de cimento, da relação água/cimento e das características intrínsecas do mesmo.

#### **4.3.4 DRX dos blocos intertravados**

Nas análises de DRX dos blocos intertravados rompidos aos 28 dias mostradas na Figura 4.13, todas as amostras apresentaram quartzo, calcita e variações de CSH. Nas amostras com areia reciclada, o DRX mostrou formação de tobermorita, o que corrobora com as resistências elevadas.

As amostras de concreto confeccionadas com os agregados reciclados secos apresentaram valores significativos de gipsita, o que pode ser atribuído ao fato do RCD conter contaminantes, apesar da triagem feita na usina. O gesso tem um efeito negativo sobre a qualidade do concreto, por razões de solubilidade, baixa dureza e baixa densidade.

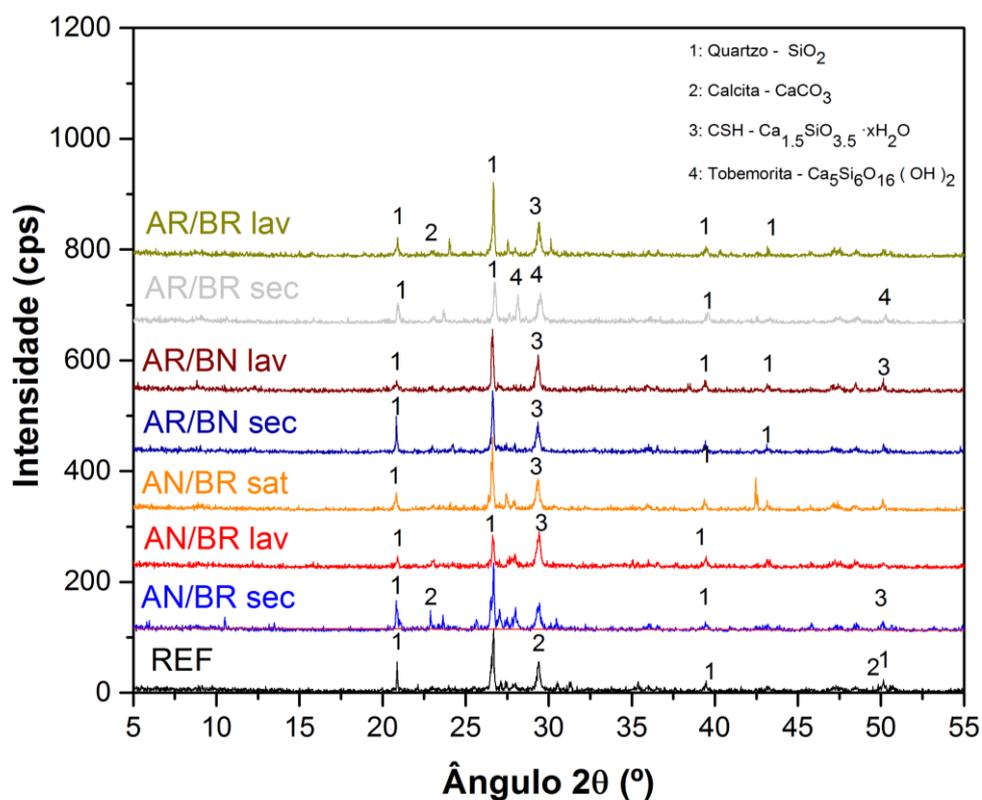


Figura 4.13 – DRX dos blocos aos 28 dias.

#### 4.3.5 Protótipo dos blocos intertravados

A análise dos blocos foi realizada pelo aspecto visual, após um ano de uso. O pavimento intertravado foi construído com agregados reciclados oriundos desta pesquisa. Nos blocos de referência pode-se perceber pouco desgaste superficial, como também não teve evidências de bordas quebradas. Os blocos fabricados com agregado miúdo reciclado sofreram pouco desgaste, entretanto, os blocos feitos com o agregado graúdo reciclado apresentaram maiores desgastes. A Figura 4.14 apresenta o protótipo após o uso.



Figura 4.14 – Protótipo construído na Usina, após um ano de uso.

Após o período de um ano da construção do protótipo, as resistências à compressão foram analisadas apenas nos blocos com substituição total de agregados reciclados miúdos e graúdos (AR/BR seca e AR/BR lavada). Pode-se observar uma redução no desempenho mecânico das peças. Os blocos produzidos com os agregados reciclados secos obtiveram uma média de 9,87MPa, ocorrendo uma redução de 34,2% quando comparada a resistência dos mesmos aos 270 dias.

Os blocos fabricados com agregados reciclados lavados apresentaram uma média de resistência a compressão de 16,05MPa, o que significa uma redução de 27% de acordo com a resistência aos 270 dias. Esta diminuição nas resistências pode ser atribuída à carga suportada pelas peças durante este período. No geral, o pavimento indica boa funcionalidade e está em uso na própria usina, suportando o carregamento demandado. As Figuras de 4.15 a 4.21 apresentam a comparação dos blocos após o período de utilização e os blocos antes de serem colocados no pavimento.



Figura 4.15 – Blocos produzidos com agregados naturais.



Figura 4.16 – Blocos produzidos com agregados reciclados secos.



Figura 4.17 – Blocos produzidos com areia natural e brita reciclada saturada.



Figura 4.18 – Blocos produzidos com areia natural e brita reciclada lavada.

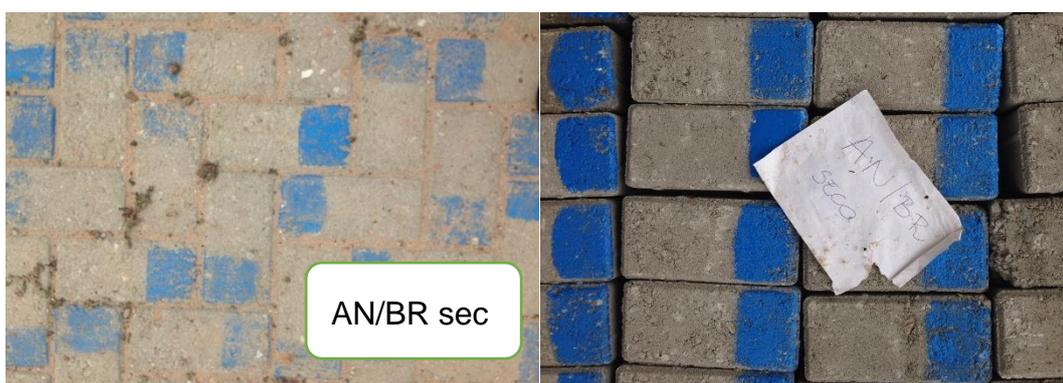


Figura 4.19 – Blocos produzidos com areia natural e brita reciclada seca.



Figura 4.20 – Blocos produzidos com agregados reciclados lavados.



Figura 4.21 – Blocos produzidos com areia reciclada lavada e brita natural.

Os blocos produzidos com areia reciclada seca e brita natural não foram colocados no protótipo, em razão de não estarem em conformidade geométrica com os demais, durante a compactação do pavimento intertravado.

Os blocos confeccionados com os agregados reciclados lavados apresentaram menor desgaste quando comparados àqueles blocos fabricados com areia ou brita reciclada sem beneficiamento.

#### 4.3.6 Análise econômica dos blocos intertravados

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, observa-se que a produção de blocos intertravados utilizando RCD apresenta um potencial tecnicamente viável para uso em área submetidas a baixos volumes de tráfego. No tocante a análise econômica, esta pesquisa se deteve em comparar os preços dos agregados na região metropolitana de Natal/RN, conforme descrições a seguir.

O preço médio da areia natural custa em torno de 60 reais/m<sup>3</sup>, enquanto que a areia reciclada custa em torno de 50 reais/m<sup>3</sup>. A diferença financeira não é tão significativa, no entanto, o ganho ambiental torna-se um fator crucial. Em comparação dos valores de agregados graúdos, observa-se uma discrepância nos preços, que pode incentivar a produção dos blocos com agregados reciclados. A brita natural custa 120 reais/m<sup>3</sup>, já a brita reciclada custa 50 reais/m<sup>3</sup>.

Apesar dos resíduos de construção e demolição apresentarem uma composição heterogênea, estes possuem grande potencial para a reciclagem. A maior

vertente é a produção de agregados reciclados, os quais possuem vasta áreas de aplicação e aproveitamento.

No geral, os agregados reciclados apresentam maiores taxas de absorção de água, como também são mais porosos e menos resistentes quando comparados aos agregados naturais. No entanto, estes agregados reciclados apresentam um custo de produção inferior aos dos agregados naturais e na sua utilização ainda há um ganho ambiental, por evitar a extração de matéria-prima e promover um destino final a um tipo de resíduo que tem considerável participação no total dos resíduos sólidos urbanos gerados.

Diante desses fatos, os agregados reciclados possuem grande potencial de utilização como insumos na construção civil. Dessa forma, evidencia-se que a produção de blocos intertravados com agregados reciclados apresenta ser técnica, econômica e ambientalmente viável.

## CAPÍTULO 5

# Considerações Finais

### 5.1 CONCLUSÕES

Os blocos de concreto para pavimento intertravado com a utilização de agregados reciclados (miúdos e graúdos), provenientes dos resíduos da construção e demolição, em substituição ao agregado natural, no geral, apresentaram um desempenho satisfatório. As propriedades dos blocos revelaram variações de acordo com as condições em que o agregado reciclado foi introduzido na mistura. Quando os agregados reciclados foram lavados, os resultados obtidos apresentaram melhores desempenhos nas propriedades testadas do que nas demais amostras.

- Quanto as propriedades físicas dos agregados reciclados de RCD analisadas: percebeu-se diferenças nas massas unitárias e específicas, os agregados reciclados são mais leves do que os naturais, devido a sua composição heterogênea. A composição granulométrica dos agregados reciclados foi mais contínua, apresentando grãos de tamanhos variados, podendo ser atribuído ao fato destes agregados serem produzidos artificialmente.
- As propriedades químicas e microscópicas dos agregados avaliadas pelos ensaios FRX, DRX e MEV mostraram que os agregados reciclados contêm mais óxidos de cálcio do que os agregados naturais, devido à presença de resíduos cerâmicos em sua composição. Também pôde ser observado na sua microestrutura, que os grãos dos agregados reciclados se apresentam esfarelados, devido ao alto teor de material pulverulento. Além disso, observou-se que os agregados naturais são mais sólidos, lisos e esféricos.
- O tipo de agregado reciclado, miúdo ou graúdo, afetou os resultados das propriedades, especificamente o desempenho mecânico do produto final. Os blocos com substituição apenas do agregado reciclado miúdo apresentaram melhores desempenhos do que os blocos com substituição do agregado graúdo, inclusive, os melhores resultados foram obtidos pelos blocos com

substituição da areia, superando os blocos de referência. Os blocos com agregados graúdos reciclados obtiveram propriedades mecânicas afetadas negativamente.

- Observou-se alterações nos aspectos visuais dos blocos colocados no trecho experimental. A textura dos blocos com agregados reciclados ficou prejudicada quando comparada aos blocos de referência, de modo a reproduzir uma aparência áspera, devido a um maior desgaste nos blocos.
- Apesar das resistências mecânicas dos blocos não atingirem o mínimo recomendado em norma, as peças podem ser utilizadas para pavimentação que receba pouca carga, como calçadas, jardins e ruas pouco movimentadas.

## **5.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS**

- Estudar outros traços a fim de otimizar e atingir os parâmetros de resistência mecânica exigidos pela norma.
- Avaliar o desgaste superficial dos blocos através de ensaios mais minuciosos e técnicas científicas.
- Avaliar os blocos por meio de outros ensaios como: fadiga, resistência a tração por compressão diametral, módulo de resiliência, etc.
- Ampliar as possibilidades de substituição dos agregados reciclados, com outras porcentagens.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland (2010): Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público. São Paulo, SP.

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (2015): A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. Relatório Pesquisa Setorial 2014-2015. São Paulo, SP.

Amadei, D. I. B.; Pereira, J. A.; Souza, R. A. D.; Meneguetti, K. S. (2012): A questão dos resíduos de construção civil: um breve estado da arte. Revista NUPEM, vol. 3, n. 5, p.185-199.

Amorim, E. F. (2013) Viabilidade técnica econômica de misturas de solo-RCD em camadas de base de pavimentos urbanos. Estudo de caso: município de Campo Verde – MT. Tese (doutorado em Engenharia civil e Ambiental) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.

ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a construção civil. Disponível em: <http://www.anepac.org.br> e acessado em 22 dez. 2015.

Angelim, R; Angelim, S.; Carasek, H. (2003) Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos nas propriedades das argamassas e dos revestimentos. V SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, Universidade de São Paulo, SP.

Angulo, S.C. (2000) Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 155 p.

Angulo, S. C. (2005) Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 167 p.

Angulo, S.; Miranda, L.; Careli, R. (2009) A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. Ambiente Construído, vol. 9, n. 1, p. 57-71.

Araújo, N. N. (2014) Desempenho de argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da grande Natal-RN. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio

Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Natal/RN, 130 p.

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

\_\_\_\_ABNT (2011) NBR 15953: Pavimento Intertravado com peças de concreto – Execução. São Paulo.

\_\_\_\_ABNT (2013) NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio. São Paulo.

\_\_\_\_ABNT (2009) NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações. São Paulo.

\_\_\_\_ABNT (2001) NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (2001) NBR NM 51: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (2006) NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (2009) NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (2009) NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (1997) NBR 11578: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (1992) NBR 5737: Cimento Portland resistente ao sulfato. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (2001) NBR NM 26: Agregados – amostragem. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (2001) NBR NM 27: Agregados – redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (2004) NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (2003) NBR NM 248: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.

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

\_\_\_\_ABNT (2006) NBR 6467: Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (1983) NBR 7809: Agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (1987) NBR 9780. Peças de concreto para pavimentação determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (1987) NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índices de vazios e massa específica. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (1987) NBR 7219: Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_ABNT (2001) NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. São Paulo.

\_\_\_\_ABNT (1997) NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. São Paulo.

Bazuco, R. S. (1999) Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 100 p.

Behera, M. S. K.; Bhattacharyya, A. K.; Minocha, R.; Deoliva, S. (2014) Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards

sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, vol. 68, p. 501-516.

Bianchini, G.; Marrocchino, E.; Tassinari, R., & Vaccaro, C. (2005) Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical–mineralogical appraisal. *Waste Management*, vol. 25, n. 2, p. 149-159.

Bittencourt, S. F. (2012) Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição. Dissertação (mestrado em Tecnologia e Inovação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 125 p.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Brasileiro, L. L. (2013) Utilização de agregados reciclados provenientes de RCD em substituição ao agregado natural no concreto asfáltico. Dissertação (mestrado em Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI. 118 p.

Braga, M.; Brito, J.; Veiga, R. (2014) Reduction of the cement content in mortars made with fine concrete aggregates. *Materials and Structures*, vol. 47, n. 1, p. 171–182.

Bravo, M.; Brito, J.; Pontes, J.; Evangelista, L. (2015) Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, vol. 99, p. 59-74.

Brito, J.; Dhir, R. K.; Silva, R. V. (2015) Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and building materials*, vol. 65, p. 201-217.

Bourscheid, J. A.; Souza, R. L. (2010) Resíduos de construção e demolição como material alternativo. Florianópolis: IF-SC, 85p.

Cabral, A. E. B.; Schalch, V.; Dal Molin, D. C. C.; Ribeiro, J. L. D. (2010) Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 24, n. 4, p. 421-430.

Carneiro, A. M. P. (1999) Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 170 p.

Carneiro, A. P.; Cassa, J. C.; Quadros, B. E.; Costa, D. B.; Sampaio, T. S.; Alberte, E. P. (2000) Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado. Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, vol. 7.

Cavalcanti, E. C. M.; Amorim, R. P. F.; Almeida Jr, G. S. (2011) Pavimentação intertravada: utilização de resíduo de construção e demolição para fabricação e assentamento de pavers. XV Encontro Latino Americano de Iniciação Científica (INIC)/ Encontro Latino Americano de Pós-graduação (EPG) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP. 6 p.

CCE/CBIC – Comissão de Economia e Estatística da Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Disponível em: < <http://www.IBdados.com.br> > e acessado em 20 dez. 2015.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente - Ministério do Meio Ambiente, Governo Federal, Brasil. (2002). Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Brasília – DF.

Contreras, M.; Teixeira, S. R.; Lucas, M. C.; Lima, L. C. N.; Cardoso, D. S. L.; Da Silva, G. A. C.; Dos Santos, A. (2016) Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). Construction and Building Materials, vol. 123, p. 594-600.

Corinaldesi, V.; Moriconi, G. (2009a) Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, vol. 23, n. 8, p. 2869-2876.

Corinaldesi, V.; Moriconi, G. (2009b) Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. Construction and Building Materials, vol. 23, n. 1, p. 289-294.

Dal Molin, D.; Vieira, G.; Lima, F. (2004) Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, vol. 19, p. 5-18.

Devenny, A.; Khalaf, F.M. (1999) The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete. Mansory International, vol. 12, n. 3, p. 81-84.

Dhir, R. K.; Silva, R. V.; Neves, R.; Brito, J. (2015) Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. Cement and Concrete composites, vol. 62, p. 22-32.

Di Maria, F.; Bianconi, F.; Micale, C.; Baglioni, S.; Marionni, M. (2016) Quality assessment for recycling aggregates from construction and demolition waste: An image-based approach for particle size estimation. *Waste Management*, vol. 48, p. 344-352.

Dilbas, H.; Simsek, M.; Cakir, O. (2014) An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. *Construction and Building Materials*, vol. 61, p. 50-59.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT (1994) ME 086 - Agregado - Determinação do índice de forma. Rio de Janeiro. 5p.

Etxeberria M, Vázquez E, Marí A, Barra M. (2006) Influence of the amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n. 5, p. 735-742.

Evangelista, L.; De Brito, J. (2010) Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, n. 1, p. 9-14.

Ferreira, K.; Gonçalves, S.; Cardoso, D.; Souza, J. Felipe, A. (2015) Avaliação de parâmetros físicos e químicos para a produção de argamassas utilizando cinza volante e resíduo de construção civil. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, vol. 1, n. 2, p. 13856-13863.

Ganjian, E; Jalull, G; Sadeghi-Pouya, H. (2015) Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, vol. 77, p. 270-275.

Gesoglu, M.; Güneyisi, E.; Öz, H. O.; Tara, I.; Yasemin, M. T. (2015) Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled Aggregates. *Construction and Building Materials*, vol. 98, p. 334-344.

Girardi, A. C. C. (2016) Avaliação da substituição total de areia natural por rcd em revestimentos de argamassa. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO. 131 p.

Godinho, P. D. (2009) Pavimento intertravado: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade. Dissertação (mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 158 p.

Goldemberg, J.; Agopyan, V.; John, V. M. (2011) O desafio da sustentabilidade na construção civil. 1. ed. São Paulo: Blucher, p. 141.

Hallack, A. B. D. O. (1998) Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 116 p.

Hansen, T.C. (1992) Recycling of demolished concrete and masonry. London: Chapman & Hall, 316 p.

Hawlitshchek, G. (2014) Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo. 166 p.

Hood, R. S. (2006) Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 150 p.

Hoque, T.; Rashid, M.; Hasan, R.; Mondol, E. (2013) Influence of Stone Dust as Partially Replacing Material of Cement and Sand on some Mechanical Properties of Mortar. International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering, vol. 2, n. 2, p. 2319–5347.

Jadovski, I. (2005) Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 180 p.

Jankovic, K.; Nikolic, D.; Bojovic, D. (2012) Concrete paving blocks and flags made with crushed brick as aggregate. Construction and Building Materials, vol. 28, n. 1, p. 659-663.

Jochem, L. (2012) Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: características físicas e propriedades da microestrutura. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 221 p.

John, V. M. (1999) Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese (Livre Docência em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 113p.

John, V. M.; Agopyan, V. (2000) Reciclagem de resíduos da construção. Seminário – Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares. Secretaria de estado do Meio Ambiente. Governo do Estado de São Paulo, São Paulo, SP.

Juan, M. S.; Gutiérrez, P. A. (2009) Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, vol. 23, n. 2, p. 872-877.

Kahn, H.; Ulsen, C.; França, R.; Hawlitschek, G.; Contessotto, R. (2014) Quantificação das fases constituintes de agregados reciclados por análise de imagens automatizada. *HOLOS*, ano 30, vol. 3, p. 44-52.

Karpinsk, L. A.; Pandolfo, A.; Reineher, R.; Guimarães, L. C. B.; Pandolfo, L. M.; Kurek, J. (2009) *Gestão Diferenciada de Resíduos da Construção Civil: Uma Abordagem Ambiental*. Porto Alegre: Edipucrs.163p.

Khatib Jr. (2005) Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n. 4, p. 763-769.

Kwan, W., Ramli, M., Kam, K., Suleiman, M. (2011) Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, vol. 26, n. 1, p. 565-573.

Laserna, S.; Montero, J. (2016) Influence of natural aggregates typology on recycled concrete strength properties. *Construction and Building Materials*, vol. 115, p. 78-86.

Leite, M. B. (2001) *Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição*. Porto Alegre. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 270 p.

Leite, F.C.; Motta, R. S; Vasconcelos, K. L.; Bernucci, L. (2011) Laboratory evaluation on recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, vol. 25, p. 2972 – 2979.

Levy, S. M. (1997) *Reciclagem do Entulho de Construção Civil para Utilização como Agregado de Argamassas e Concretos*. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 145 p.

Lima, J. A. R. (1999) *Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos*.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 204 p.

Lima, F. S. N. S. (2005) Aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de argamassas. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba. 110 p.

Limbachiya, E.; Marrocchino, A.; Kouloris. (2007) Caracterização química mineralógica de agregados de concreto graúdo reciclado. *Gestão de Resíduos*, vol. 27, p. 201-208.

Lovato, P.; Possan, E.; Dal Molin, D.; Masuero, A.; Ribeiro, J. (2012) Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, vol. 26, p. 437-447.

Lopez-Gayarre, F.; Vinuela, R.; Serrano-Lopez, M.; Lopez-Colina, C. (2015) Influence of the water variation on the mechanical properties of concrete manufactured with recycled mixed aggregates for pre-stressed componentes. *Construction and Building Materials*, vol. 94, p. 844-850.

Marchioni, L. M. (2012) Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada. Dissertação (mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 112 p.

Marchioni, M.; Silva, C. O. (2011) Pavimento intertravado permeável – melhores práticas. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). 24p.

Martínez, P. S., Cortina, M. G., Martínez, F. F., Sánchez, A. R. (2016) Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. *Journal of Cleaner Production*, vol. 118, p. 162-169.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2008) *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ibracon, p. 674.

Melo, A. B.; Gonçalves, A., F.; Martins, I.M. (2011) Construction and demolition waste generation and management in Lisbon. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, p. 1252 – 1264.

Miranda, L. F. R. (2005) Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo. 439 p.

Morales, M. M.; Zamorano, M.; Ruiz-Moyano, A.; Espinosa, I. V. (2011) Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and building materials*, vol. 25, p. 742-748.

Neville, A.M. (1997) *Propriedades do Concreto*. Tradução Salvador E. Giammusso. 2 ed. São Paulo: PINI, p. 828.

Ozalp, F.; Yilmaz, H. D.; Kara, M.; Kaya, O.; Sahin, A. (2016) Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, vol. 110, p. 17-23.

Pepe, M.; Toledo Filho, R. D.; Koenders, E. A.; Martinelli, E. (2014) Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 69, p. 124-132.

Pedrozo, R. (2008) Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 161 p.

Pedrozo, R.; Rocha, J.; Cheriaf, M. (2008) Estudo da influência de agregados reciclados finos de RCD em substituição do agregado miúdo natural em propriedades de concretos e argamassas. XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Fortaleza, Ceará.

Penteadó, C. S. G.; De Carvalho, E. V.; Lintz, R. C. C. (2016) Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, p. 514-520.

Pinto, T. P. (1999) Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. Tese (doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 189 p.

Poon, C. S.; Kou, S. C.; Lam, L. (2002) Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, vol. 16, p. 281-289.

Poon, C. S.; Chan, D. (2006) Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*, vol. 20, p. 578-585.

Poon, C. S.; Duan, Z. H. (2014) Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Material and Design*, vol.58, p 19-29.

Poulikakos, L. D.; Papadaskalopoulou, C.; Hofko, B.; Gschösser, F.; Falchetto, A. C.; Bueno, M.; Loizidou, M. (2017) Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 116, p. 32-44.

Rodriguez, C.; Parra, C.; Casado, G.; Minano, I.; Albaladejo, F.; Benito, F.; Sanchez, I. (2016) The incorporation of construction and demolition wastes as recycled mixed aggregates in non-structural concrete precast pieces. *Journal of Cleaner Production*, vol. 127, p. 152-161.

Sabai, M. M.; Cox, M. G. D. M.; Mato, R. R.; Egmond, E. L. C.; Lichtenberg, J. J. N. (2013) Concrete block production from construction and demolition waste in Tanzania. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 72, p. 9-19.

Sengel, S.; Topçu, I. B. (2004) Properties of concrete produced with waste concrete aggregate. Civil Engineering Department, Osmangazi University, Turkey.

Schneider, D. M. (2003) Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo. Dissertação (mestrado em Saúde Pública) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 131 p.

Silva, M. B. L. (2014) Novos materiais à base de resíduos de construção e demolição (RCD) e resíduos de produção de cal (RPC) para uso na construção civil. Dissertação (mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 73 p.

Silva Filho, A. F. (2005) Gestão dos resíduos sólidos das construções prediais na cidade do Natal-RN. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 136 p.

Soutsos, M. N.; Tang, K.; Millard, S. G. (2012) The use of recycled demolition aggregate in precast concrete products – Phase III: Concrete pavement flag. *Construction and Building Materials*, vol. 36, p. 674-680.

Stefanidou, M.; Anastasiou, E.; Filikas, G. (2014) Recycled sand in lime-based mortars. *Waste Management*, vol. 34, p. 2595-2602.

Tavakoli, M.; Soroushian, P. (1996) Strengths of Recycled Aggregate Concrete Made Using Field-Demolished Concrete as Aggregate. *ACI Materials Journal*, vol. 93, n. 2, pp. 182-190.

Tessaro, A.; Sá, J.; Scremin, L. (2010) Quantificação e classificação de resíduos procedentes da construção e demolição no município de Pelotas, RS. *Ambiente Construído*, vol. 12, n. 2, p. 121-130.

Torgal, F. P.; Jalali, S. (2010) A sustentabilidade dos materiais de construção civil. 1 ed. TecMinho, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Vieira, C. S.; Pereira, P. M. (2015) Uso de materiais de construção e demolição reciclados em aplicações geotécnicas: uma revisão. *Recursos, Conservação e Reciclagem*, vol. 103, p. 192-204.

Ulsen, C. (2011) Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo. 222 p.

Xiao, J.; Li, L.; Shen, L.; Poon, C. S. (2015) Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading. *Cement and Concrete Research*, vol. 71, p. 46-55.

Zordan, S. E. (1997) A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil – Unicamp, Campinas, 140 p.