

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LILIANE LIMA SAMPAIO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE RESÍDUOS BENEFICIADOS  
DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO UTILIZADOS NA  
FABRICAÇÃO DE CONCRETO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS**

Recife/PE  
Maio/2013

LILIANE LIMA SAMPAIO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE RESÍDUOS BENEFICIADOS  
DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO UTILIZADOS NA  
FABRICAÇÃO DE CONCRETO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Materiais de Construção

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva

Recife/PE  
Maio/2013

LILIANE LIMA SAMPAIO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE RESÍDUOS BENEFICIADOS  
DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO UTILIZADOS NA  
FABRICAÇÃO DE CONCRETO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS**

BANCA EXAMINADORA:

Orientador:

---

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira  
Universidade Católica de Pernambuco

Co-orientador:

---

Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva  
Universidade Católica de Pernambuco

Examinadora externa:

---

Prof. Dr. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette  
Universidade de Pernambuco

Examinador interno:

---

Prof. Dr. Sílvio Romero Melo Ferreira  
Universidade Católica de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiro aos meus pais, que me apoiaram nesses anos de mestrado, mesmo querendo que eu estivesse ainda morando em Natal/RN com eles, nunca deixaram de me ajudar e me estimular. Sem eles não seria possível realizar este trabalho.

Agradecer ao meu marido Gilvan, por seu companheirismo, meu filho que ficou tantas vezes quietinho para eu estudar, meus irmãos, que mesmo de longe me incentivavam. Também a minha sogra, que tantas vezes ficou com meu filho para eu poder ir às aulas.

Gostaria de agradecer muito ao meu orientador, Prof. Dr. Joaquim Teodoro, por todo apoio durante os momentos mais difíceis, pela compreensão de minhas limitações, pela sua ajuda quando eu mais precisei e por tudo que aprendi com ele.

Agradecer à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Eugenia Gimenez Boscov, pela oportunidade de ter o apoio financeiro do Programa Pró-engenharias, através de minha bolsa de estudos.

Agradecer ao meu co-orientador Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira, por dar início ao meu trabalho, sendo responsável por trazer os resíduos de construção e demolição provenientes da Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina/PE e ceder o material para minha pesquisa, além de todas as contribuições a respeito do tema.

Ao Prof. Dr. Silvio Romero por deixar sempre o Laboratório de Geotecnia da Unicap a minha disposição, bem como suas correções do meu trabalho.

Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Unicap por todo o conhecimento transmitido em suas aulas.

Aos amigos do mestrado, em especial a Adriana, que tanto me incentivou e não me deixou desistir, pela ajuda nos trabalhos e pelos momentos de descontração.

Aos laboratoristas Washington e Leandro grande ajuda nos ensaios.

A André, que me ajudou em todos os ensaios, me explicando os resultados, tirando minhas dúvidas sobre as tabelas, pela paciência e atenção ao meu trabalho, pela disposição em sempre me ajudar, até quando estava ocupado, sendo um verdadeiro amigo para todas as horas.

E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

SAMPAIO, Liliane Lima. **Comportamento mecânico de resíduos beneficiados da construção e demolição utilizados na fabricação de concreto e estabilização de solos**. Recife: UNICAP, 2013. 100p. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Recife.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise das características mecânicas do resíduo de construção e demolição (RCD), da Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina/PE, com o objetivo de avaliar o uso de resíduo beneficiado na produção de concretos e na estabilização de solos.

Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização do resíduo e dos materiais constituintes do concreto. Em seguida, foram dosados três traços para a produção dos concretos, sendo um traço para o concreto de referência e dois traços para os concretos com substituições de agregado natural por agregado reciclado nas proporções de 50% em um traço e de 100% no outro traço. No total confeccionou-se 15 corpos de prova para cada traço e as mesmas dimensões do concreto para referência, totalizando 45 corpos de prova produzidos. Foram realizados ensaios destrutivos (resistência à compressão simples e por tração diametral) e não destrutivos (ultrassom e esclerometria). Também se produziu duas vigas em concreto, um concreto de referência e outro concreto com substituição de 100% do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado para ensaios de flexão em vigas.

Posteriormente, foi avaliado o comportamento geotécnico do resíduo para utilização como solo em obras de contenção, através de ensaios de granulometria, limites, compactação, CBR e compressão edométrica, sendo ensaiado e avaliado o comportamento de cada material, o RCD e o solo natural de referência do Alto do reservatório e as incorporações realizadas, nas proporções de 25% de solo mais 75% de RCD (mistura 1), 50% de solo mais 50% de RCD (mistura 2) e 75% de solo mais 25% de RCD (mistura 3).

Com os resultados obtidos, foram avaliadas as características físicas e mecânicas dos materiais desta pesquisa, efetuadas as correlações entre os ensaios destrutivos e não destrutivos dos concretos confeccionados e analisado o comportamento do resíduo para sua utilização como solo em obras de contenção. Pode-se concluir ao final da análise dos resultados que os concretos produzidos com resíduos atingem resistências médias, podendo ser utilizados em concretos sem função estrutural. E o resíduo para utilização em estabilização de solos pode ser utilizado na construção de rodovias, como material para reforço de subleito, para revestimento primário e sub-base.

*Palavra-Chave: resíduo de construção e demolição, concreto com agregado reciclado, estabilização de solos.*

SAMPAIO, Liliane Lima. **Comportamento mecânico de resíduos beneficiados da construção e demolição utilizados na fabricação de concreto e estabilização de solos**. Recife: UNICAP, 2013. 100p. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Recife.

### **ABSTRACT**

This study reviews an analysis of the mechanical characteristics of construction and demolition waste (CDW), a central material recovery facility from Petrolina/PE, with the objective to evaluate the waste processing to use in the produce of concrete and soil stabilization.

Initially, tests were performed to characterize the waste materials and the constituents of the concrete. Then, three traits were measured for the production of concrete, with a dash to the reference concrete and two strokes for concrete replacements of natural aggregate by recycled aggregate in the proportions of 50% in one stroke and 100% in the other trait . In total it was made 15 specimens for each trait and the same dimensions of the concrete for reference, totaling 45 specimens produced. Were conducted destructive testing (compressive strength and diametral tensile) and nondestructive (ultrasonic and rebound hammer). Also were produced two concrete beams, one reference concrete and other concrete with 100% replacement of natural aggregate by aggregate recycled for bending tests on beams.

Subsequently, were evaluated the geotechnical behavior of the waste for use as soil containment works through testing particle size, limits, compaction, CBR and edometric being tested and valued the behavior of each material, and the RCD natural ground reference of the Alto do Reservatório and the mergers undertaken, in proportions of 25% of soil more 75% of RCD (mixture 1), 50% of soil more 50% of RCD (mixture 2) and 75% of soil and 25% of RCD (mixture 3). With these results, we evaluated the physical and mechanical material of this research, the correlations made between destructive and non-destructive testing of concrete made and analyzed the behavior of the waste for use as soil containment works. It can be concluded from the results of the analysis that concretes produced with the waste reaches average resistance, and may be used to produce concrete with non-structural function. And for use in soil stabilization, the residue can be used in road construction, as reinforcing material for subgrade, primer coating and the subfloor.

*Keyword: construction and demolition waste, concrete with recycled aggregate, soil stabilization.*

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1: Composição do resíduo de construção civil gerado na Holanda                 | 23 |
| Figura 2.2: Composição do resíduo de construção civil gerado no Japão                   | 23 |
| Figura 2.3: RCD cinza da usina de Itaquera  | 24 |
| Figura 2.4: RCD vermelho da usina de Itaquera   | 24 |
| Figura 2.5: Composição do resíduo de construção civil gerado em Salvador/BA             | 24 |
| Figura 2.6: Usinas de reciclagem  | 29 |
| Figura 2.7: Central de tratamento de resíduos de Petrolina/PE                           | 30 |
| Figura 2.8: Usina de beneficiamento de RCD Ciclo Ambiental                              | 31 |
| Figura 2.9: Processamento de RCD  | 31 |
| Figura 2.10: Execução de aterro   | 33 |
| Figura 2.11: Revestimento de via com agregado reciclado                                 | 33 |
| Figura 2.12: Uso de blocos de concreto fabricado com agregado reciclado em pavimentação | 37 |
| Figura 2.13: Gabião preenchido com RCD  | 39 |
| Figura 2.14: Fechamento de vala com RCD após substituição da tubulação de água          | 40 |
| Figura 2.15: Realização de camada de base de brita corrida com RCD                      | 40 |
| Figura 2.16: Reabilitação de pavimento danificado                                       | 41 |
| Figura 2.17: Aplicação da camada final com CBUQ   | 41 |
| Figura 2.18: Corte do método proposto para fechamento de vala                           | 41 |
| Figura 3.1: Usina de Reciclagem   | 44 |
| Figura 3.2: Vibração na grade separadora  | 44 |
| Figura 3.3: Grade de separação de finos com aspersores                                  | 45 |
| Figura 3.4: Britador de mandíbulas  | 45 |
| Figura 3.5: Recolhimento de materiais ferrosos  | 45 |
| Figura 3.6: Ensaio de abatimento do concreto de referência                              | 48 |
| Figura 3.7: Ensaio de abatimento do concreto com agregado reciclado                     | 48 |
| Figura 3.8: Moldagem dos corpos de prova  | 49 |
| Figura 3.9: Equipamento de ultrassom  | 50 |
| Figura 3.10: Esclerômetro de reflexão   | 50 |
| Figura 3.11: Prensa hidráulica  | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.12: Ensaio de tração por compressão diametral   | 51 |
| Figura 3.13: Ensaio de flexão em viga  | 52 |
| Figura 3.14: Ensaio de ultrassom   | 53 |
| Figura 3.15: Ensaio de esclerometria   | 54 |
| Figura 3.16: Ensaio de granulometria: sedimentação   | 56 |
| Figura 3.17: Ensaio de granulometria: peneiramento   | 56 |
| Figura 3.18: Ensaio de CBR   | 57 |
| Figura 3.19: Ensaio de compressão edométrica: prensa edométrica  | 58 |
| Figura 3.20: Ensaio de compressão edométrica: célula edométrica  | 58 |
| Figura 4.1: Composição gravimétrica do RCD de Petrolina/PE   | 59 |
| Figura 4.2: Ruptura das vigas com concreto convencional  | 66 |
| Figura 4.3: Ruptura das vigas com concreto com 100% de RCD-miúdo   | 66 |
| Figura 4.4: Curva Força x Deslocamentos das Vigas Ensaadas   | 67 |
| Figura 4.5: Correlação entre velocidade de ondas ultrassônicas e resistência à compressão do concreto para os Traços R, 50% e 100% | 69 |
| Figura 4.6: Correlação entre índice esclerométrico e resistência à compressão do concreto para os Traços R, 50% e 100%             | 70 |
| Figura 4.7: Curva granulométrica do RCD  | 72 |
| Figura 4.8: Comparação das curvas granulométricas – misturas e solo natural  | 72 |
| Figura 4.9: Curvas de compactação  | 74 |
| Figura 4.10: Comparação das curvas granulométricas do RCD antes e depois da compactação  | 76 |
| Figura 4.11: Gráfico de deformação vertical versus log pressão – Misturas amostra inundada   | 78 |
| Figura 4.12: Gráfico de deformação vertical versus log pressão – Misturas amostra seca   | 79 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1: Porcentagem de perdas de materiais em obras  | 21 |
| Tabela 2.2: Estimativas de geração de resíduos de construção civil no Brasil                   | 21 |
| Tabela 2.3: Estimativas de geração de resíduos de construção civil                             | 21 |
| Tabela 2.4: Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga, São Paulo         | 23 |
| Tabela 2.5: Ocorrência de vetores em áreas de deposição de RCD em São José do Rio Preto        | 26 |
| Tabela 2.6: Recicladoras de resíduos   | 28 |
| Tabela 2.7: Composição gravimétrica do RDC de Petrolina (Paula, 2010)                          | 30 |
| Tabela 2.8: Resumo de aplicações de utilização de RCD  | 35 |
| Tabela 2.9: Recomendações para uso de agregados reciclados em concretos                        | 36 |
| Tabela 3.1: Normas e ensaios realizados  | 47 |
| Tabela 3.2: Normas e ensaios realizados do cimento utilizado                                   | 47 |
| Tabela 3.3: Consumo de materiais por traço do concreto   | 48 |
| Tabela 4.1: Características físicas da areia natural   | 60 |
| Tabela 4.2: Características físicas do agregado miúdo reciclado                                | 60 |
| Tabela 4.3: Características físicas da brita   | 60 |
| Tabela 4.4: Teor de materiais pulverulentos de outros autores                                  | 62 |
| Tabela 4.5: Resumo da caracterização física dos materiais constituintes do concreto            | 62 |
| Tabela 4.6: Resultados dos ensaios realizados no cimento                                       | 63 |
| Tabela 4.7: Consumo por traço do concreto produzido  | 63 |
| Tabela 4.8: Resultado dos ensaios de resistência à compressão simples aos 28 dias              | 64 |
| Tabela 4.9: Resultado dos ensaios de resistência à compressão por tração diametral aos 28 dias | 65 |
| Tabela 4.10: Resumo dos resultados de velocidade de ondas ultrassônicas aos 28 dias            | 68 |
| Tabela 4.11: Equações de correlação entre $f_c$ e $V$ (km/s)                                   | 68 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 4.12: Resumo dos resultados de índice esclerométrico do Traço R aos 28 dias     | 70 |
| Tabela 4.13: Equações de correlação entre $f_c$ e IE                                   | 70 |
| Tabela 4.14: Limites de Atterberg  | 71 |
| Tabela 4.15: Composição das amostras   | 72 |
| Tabela 4.16: Classificação do solo natural, RCD e misturas                             | 73 |
| Tabela 4.17: Parâmetros estabelecidos pela NBR 15116:2004                              | 73 |
| Tabela 4.18: Resumo dos resultados dos ensaios de compactação                          | 75 |
| Tabela 4.19: Resultados dos ensaios de compactação de RCD de outros autores            | 75 |
| Tabela 4.20: Resumo dos resultados dos ensaios de CBR                                  | 76 |
| Tabela 4.21: Requisitos específicos para agregado reciclado destinado à pavimentação   | 77 |
| Tabela 4.22: Resumo dos resultados dos ensaios de compressibilidade amostras secas     | 77 |
| Tabela 4.26: Resumo dos resultados dos ensaios de compressibilidade amostras inundadas | 78 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AMR – Agregado miúdo reciclado

CBR – California Bearing Ratio.

CTR – Central de tratamento de resíduos

ISC – Índice Suporte Califórnia.

RCC – Resíduo(s) da Construção Civil.

RCD – Resíduo(s) da Construção e Demolição.

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>   | 15 |
| 1.1. Objetivos   | 16 |
| 1.1.1. Objetivo geral  | 16 |
| 1.1.2. Objetivos específicos                                       | 16 |
| 1.3. Estrutura da dissertação                                      | 17 |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                    | 19 |
| 2.1. Histórico da reciclagem de resíduos de construção e demolição | 19 |
| 2.2. Resíduos de construção e demolição                            | 20 |
| 2.2.1. Geração do RCD  | 20 |
| 2.2.2. Composição e classificação do RCD                           | 22 |
| 2.2.3. Gestão do RCD   | 24 |
| 2.2.4. Impactos Ambientais Gerados pelos RCD                       | 25 |
| 2.2.5. Legislação Vigente  | 26 |
| 2.2.5.1. Resolução Conama  | 26 |
| 2.3. Centrais de reciclagem de resíduos de construção e demolição  | 28 |
| 2.3.1. Centrais no exterior  | 28 |
| 2.3.2. Centrais no Brasil  | 28 |
| 2.3.3. Centrais em Pernambuco                                      | 29 |
| 2.3.3.1. CTR Petrolina/PE  | 29 |
| 2.3.3.2. Ciclo ambiental   | 31 |
| 2.4. Utilização de resíduos de construção e demolição              | 32 |
| 2.4.1. Aterros   | 32 |
| 2.4.2. Pavimentação  | 33 |
| 2.4.3. Produção de concreto e seus componentes                     | 36 |
| 2.4.4. Melhoramento de solos com estacas de compactação            | 38 |
| 2.4.5. Argamassas  | 38 |
| 2.4.6. Camadas drenantes   | 38 |
| 2.4.7. Gabião  | 39 |
| 2.4.8. Estruturas de solos reforçados                              | 39 |
| 2.4.9. Reabilitação de pavimentos                                  | 40 |
|  | 42 |

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

|  |           |
|--|-----------|
| 3.1. Composição gravimétrica e beneficiamento do RCD proveniente de Petrolina/PE | 43        |
| 3.1.1. Composição gravimétrica   | 43        |
| 3.1.2. Etapas de beneficiamento do resíduo                                       | 43        |
| 3.2. Caracterização dos materiais constituintes do concreto                      | 46        |
| 3.3. Dosagem experimental  | 47        |
| 3.4. Moldagem dos corpos de prova  | 49        |
| 3.5. Ensaios destrutivos e não destrutivos                                       | 49        |
| 3.5.1. Ensaios destrutivos   | 51        |
| 3.5.1.1. Ensaio de resistência à compressão simples                              | 51        |
| 3.5.1.2. Ensaio de tração por compressão diametral                               | 51        |
| 3.5.1.3. Ensaio de Flexão em Viga  | 52        |
| 3.5.2. Ensaios não destrutivos   | 53        |
| 3.5.2.1. Ensaio de ondas ultrassônicas   | 53        |
| 3.5.2.2. Ensaio de esclerometria   | 54        |
| 3.6. Estudos do comportamento geotécnico do solo com adições de RCD              | 54        |
| 3.6.1. Limites de Atterberg (limites de liquidez e plasticidade)                 | 55        |
| 3.6.1.2. Ensaio de granulometria   | 55        |
| 3.6.2. Ensaio de Compactação   | 56        |
| 3.6.3. Ensaio de CBR   | 56        |
| 3.6.4. Ensaio de compressão edométrica   | 57        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>  | <b>59</b> |
| 4.1. Caracterização do agregado miúdo reciclado                                  | 59        |
| 4.1.1. Composição gravimétrica   | 59        |
| 4.1.2. Características físicas dos materiais constituintes do concreto           | 59        |
| 4.1.3. Consumo de materiais por traço  | 63        |
| 4.2. Ensaios destrutivos   | 64        |
| 4.2.1. Ensaio de resistência à compressão simples e tração diametral             | 64        |
| 4.2.2. Ensaio de Flexão em Viga  | 65        |
| 4.3. Ensaios não destrutivos   | 67        |
| 4.3.1. Ensaio de velocidade de ondas ultrassônicas                               | 67        |

|  |    |
|--|----|
| 4.3.2. Esclerometria                                   | 69 |
| 4.4. Caracterização dos solos com adições              | 71 |
| 4.4.1 Ensaio de limites de liquidez e plasticidade     | 71 |
| 4.4.2 Ensaio de granulometria                          | 71 |
| 4.4.3 Ensaio de compactação                            | 74 |
| 4.4.4 Ensaio de CBR                                    | 76 |
| 4.4.5 Ensaio compressão edométrica                     | 77 |
| <b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b> | 80 |
| 5.1. Conclusões  | 80 |
| 5.2. Sugestões para pesquisas futuras                  | 82 |
| <b>REFERÊNCIAS</b>                                     | 83 |
| <b>ANEXOS</b>  | 90 |
| <b>ANEXO 1 BENEFICIAMENTO DO RCD</b>                   | 92 |
| <b>ANEXO 2 LEGISLAÇÃO VIGENTE</b>                      | 96 |

## 1 INTRODUÇÃO

A reciclagem e reutilização dos RCD são consideradas como uma alternativa positiva à redução da atual política de deposição em aterro, contribuindo para a melhoria das condições do meio ambiente, para a diminuição da exploração de recursos naturais e energéticos e para a redução dos custos da construção. A avaliação da utilização de RCD no sector da construção tem sido estimulada em várias partes do mundo e muitos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de ampliar o conhecimento sobre o comportamento destes resíduos para a produção de novos materiais (LEITE, 2001).

O desenvolvimento de tecnologias para reciclagem de resíduos ambientalmente eficientes e seguras, que resultem em produtos com desempenho técnico adequado e que sejam economicamente competitivas nos diferentes mercados é um importante desafio técnico e metodológico (ROCHA, 2003).

De forma geral, as pesquisas de reciclagem de resíduos se limitam a aspectos do desenvolvimento técnico do material e em analisar os impactos ambientais do processo. Entretanto, a ênfase em viabilidade do mercado é um compromisso com a eficácia da pesquisa, pois os benefícios sociais de um processo de pesquisa somente vão se realizar na sua totalidade se o novo produto produzido gerar empregos reduzir o volume de aterros, consumir resíduos em vez de recursos naturais e evitar a contaminação do ambiente ou o comprometimento da saúde da população (ROCHA, 2003).

A falta de aproveitamento dos resíduos e a conseqüente geração de grandes volumes de RCD que necessitam de uma destinação final adequada trazem impactos não só ambientais, mas econômicos também. Na cidade do Recife estima-se um custo de R\$ 4,5 milhões com coleta de resíduos volumosos e de entulhos dispostos de modo irregular em locais públicos (GUSMÃO, 2008).

A utilização de RCD é necessária e urgente para o setor da construção civil, não só pela questão ambiental, mas também econômica e social. Neste sentido, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de minimizar a geração e incentivar a reciclagem dos resíduos (RODRIGUES, 2011).

## 1.1. OBJETIVOS

A grande quantidade de resíduos gerados pela construção civil, a dificuldade na destinação final do mesmo, o impacto ambiental causado mostram-se crescentes no cenário atual. Sendo assim, a diminuição do uso de recursos naturais com a utilização de resíduos de construção e demolição mostra-se uma alternativa viável.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o uso de resíduos da construção e demolição, proveniente da Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina/PE, para a produção de concretos e estabilização de solos. Os resíduos de construção e demolição foram cedidos pela Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina/PE em colaboração com o Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira. O trabalho teve financiamento do programa Pró-engenharias/ Capes que, em parceria com a UNICAP, visa desenvolver pesquisas sobre a utilização de resíduos em obras geotécnicas. Tem como coordenadora geral a Prof.<sup>a</sup> Maria Eugenia Gimenez Boscov e como coordenador da instituição corresponsável o Prof. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira.

### 1.1.1. Objetivo Geral:

Este trabalho tem como objetivo investigar o potencial de utilização de resíduos beneficiados de construção e demolição, proveniente da Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina/PE, como agregado miúdo reciclado para a produção de concretos, e utilizado como solo com substituição total ou parcial do solo natural por agregado reciclado para estabilização de solos.

### 1.1.2. Objetivos Específicos:

- Realizar ensaios de caracterização física e mecânica dos resíduos e demais materiais, em condições laboratoriais;
- Avaliar a influência das características do concreto com adição de agregado reciclado miúdo nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido;

- Avaliar a utilização do resíduo como material de aterro para utilização na estabilização de solos;
- Produzir uma revisão bibliográfica sobre o tema, com foco nas aplicações dos resíduos;
- Caracterizar o resíduo beneficiado da construção e demolição e os demais materiais utilizados (areia e brita naturais, cimento Portland, solo natural);
- Realizar estudo de dosagem para a produção de concretos de referência e com agregado reciclado miúdo;
- Fazer ensaios laboratoriais, tais como: massa específica, abatimento, resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, ensaios de ultrassom e esclerometria, para conhecer as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido;
- Realizar ensaios de caracterização, compactação, CBR e adensamento do resíduo beneficiado da construção e demolição, para avaliar sua utilização na estabilização de solos;
- Analisar e interpretar os resultados obtidos.

### 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 do trabalho apresenta comentários sobre alguns textos importantes na análise dos resíduos de construção e demolição, percorrendo sobre o panorama internacional e a situação dos resíduos no Brasil, a legislação vigente e suas aplicações na construção civil, bem como trata sobre a gestão dos resíduos, impactos ambientais causados e as usinas de beneficiamento no Brasil.

O Capítulo 3 descreve a composição do resíduo proveniente da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de Petrolina e os procedimentos de caracterização mecânica utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Em seguida, faz-se uma definição e caracterização dos materiais constituintes, com a divisão em duas partes, 1 e 2, sendo a parte 1 composta pelo estudo do concreto e materiais constituintes e a parte 2 relativa aos estudos do comportamento geotécnico do resíduo a ser utilizado como material na estabilização de solos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios realizados, a análise e comparação dos resultados com a literatura sobre a reciclagem dos resíduos de construção e demolição. Estão descritos os resultados dos ensaios do concreto no estado fresco e endurecido, a caracterização dos materiais utilizados e também a avaliação geotécnica do resíduo, com a apresentação dos resultados dos ensaios de granulometria, limites de Atterberg, compactação, CBR e compressão edométrica.

Na Conclusão, são apresentados comentários gerais sobre os vários aspectos abordados no trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

O anexo 1 mostra o processo de beneficiamento da Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina/PE e o anexo 2, a legislação vigente.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são tratados os temas com relação à reciclagem de resíduos de construção e demolição, através de um breve histórico do quadro da reciclagem no Brasil e no mundo. São tratados também temas como a resolução Conama nº 307 e suas modificações, a geração e os impactos causados pelos resíduos, as formas de beneficiamento e o aproveitamento dos resíduos em novas obras de engenharia.

### 2.1. HISTÓRICO DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A utilização de resíduos de construção e demolição é bastante antiga, sendo praticada desde a antiguidade clássica. Segundo Santos (1975), o uso de restos de telhas, tijolos e utensílios de cerâmica como agregado graúdo em concretos teve início nas construções da Grécia e Roma antigas.

Pelos anos de 1860 há notícias de existir na Alemanha o uso de blocos de concreto britados como agregado para novos produtos de concreto (MIRANDA et al, 2009). Os primeiros estudos sistemáticos sobre as características dos agregados reciclados têm início neste mesmo país.

O uso significativo de RCD reciclado só veio acontecer após a Segunda Guerra Mundial, em resposta à necessidade de satisfazer a enorme demanda por materiais de construção e à necessidade de remover os escombros das cidades europeias (SCHULZ; HENDRICKS, 1992, apud PINTO, 1999).

Nas últimas décadas o beneficiamento e utilização de resíduos vêm se intensificando em vários países, como Holanda, Dinamarca, Estados Unidos, Japão, França, Itália, Espanha, Reino Unido, Rússia e mais recentemente o Brasil (LIMA, 1999). Ainda segundo o autor, os motivos que aumentaram o consumo de materiais reciclados da construção foram: a exploração em demasia de jazidas de agregados naturais, os prejuízos ao meio ambiente e o crescimento do volume de resíduos.

Na Europa, a reciclagem dos RCD vem crescendo aceleradamente devido a fatores que segundo Lima (1999), incluem a compreensão de preservar os agregados naturais para concretos de alta resistência e protendidos, e de a Europa utilizar 80% de concreto com resistências entre 20 e 25 Mpa, que podem ser elaborados com agregados reciclados, que atingem a resistência referida.

No Brasil a prática do beneficiamento de resíduos é recente, com a primeira unidade de beneficiamento sendo instalada em 1991 (CARNEIRO, 2005).

## 2. 2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

### 2.2.1. Geração do RCD

O RCD, segundo Angulo (2000), possui duas fontes de geração: a construção e a demolição. Segundo o autor, os resíduos de construção representam de 19 a 52% do total, enquanto a demolição representa de 48 até 81% do total de resíduos.

Durante a construção, as principais fontes de geração de RCD estão ainda na fase de projeto, com erros e modificações projetuais e contratuais. Na execução de obras, as perdas de materiais de construção devido ao processo construtivo utilizado representam uma quantidade significativa na geração de RCD (SANTOS, 2008). Ainda segundo Santos (2008), a geração de resíduos também está presente na manipulação incorreta dos materiais, quer seja durante o transporte ou na armazenagem inadequada.

Segundo Ulsen (2006) as porcentagens de perdas de matéria prima se devem ao fato da utilização de diferentes métodos construtivos, resultando em uma quantidade considerável de material que pode ser reaproveitada.

Segundo Pinto (1995) apud Freitas (2009), as perdas de materiais variam bastante dependendo do tipo de material. A Tabela 2.1 mostra a porcentagem de perdas em obras de construção civil.

Tabela 2.1: Porcentagem de perdas de materiais em obras  
 Fonte: Pinto, 1995 apud Freitas, 2009

| <b>Materiais</b> | <b>Perdas (%)</b> |
|------------------|-------------------|
| Areia            | 39                |
| Cimento          | 33                |
| Concreto         | 1                 |
| Aço              | 26                |
| Tijolos/Blocos   | 27                |
| Argamassas       | 91                |

No Brasil, estima-se que, com uma população urbana em torno de 137 milhões de habitantes, a geração de RCD atinja 68,5 milhões de toneladas por ano (ANGULO, 2002). O estudo de Fonseca (2012) revela que nas cidades brasileiras de médio porte o RCD representa de 41 a 71% do total dos resíduos sólidos urbanos gerados e, em Brasília, o valor do RCD sobe para cerca de 70%. Em Fortaleza/CE, segundo Lopes (2007), este valor atinge cerca de 30%, sendo o RCD oriundo dos canteiros de obras da cidade. Em Petrolina/PE, de onde é proveniente o resíduo beneficiado avaliado no presente trabalho, 48,67% de RCD são gerados no município (SANTOS, 2008).

Segundo Macedo (2010), um estudo realizado em 2010 pela ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) e o IBGE revelou um aumento na geração de RCD no Brasil de 8,7% em relação ao ano anterior, sendo coletadas em torno de 99 mil toneladas de RCD por dia no país. A Tabela 2.2 mostra a quantidade total de RCD coletada no Brasil nos anos de 2009 e 2010.

Tabela 2.2: Estimativas de geração de resíduos de construção civil no Brasil  
 Fonte: Adaptado de Macedo (2010)

| <b>Região</b> | <b>RCD coletado (t/dia) 2009</b> | <b>RCD coletado (t/dia) 2010</b> |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Norte         | 3.405                            | 3.514                            |
| Nordeste      | 15.663                           | 17.995                           |
| Centro-Oeste  | 10.997                           | 11.525                           |
| Sudeste       | 46.990                           | 51.582                           |
| Sul           | 14.389                           | 14.738                           |
| Brasil        | 91.444                           | 99.354                           |

Na Europa a geração de resíduos de construção varia em torno de 500

milhões de toneladas por ano (EUROSTAT, ENVIRONMENT AND ENERGY, 2010 apud MACEDO 2010). Na Tabela 2.3 tem-se um panorama da situação mundial da geração de resíduos.

Tabela 2.3: Estimativas de geração de resíduos de construção civil  
Fonte: Adaptado de John (2002)

| País           | M ton./ano  | Kg/hab.    |
|----------------|-------------|------------|
| Suécia         | 1,2 – 6     | 136 - 680  |
| Holanda        | 12,8 - 20,2 | 820 - 1300 |
| Estados Unidos | 136 - 171   | 463 - 584  |
| Reino Unido    | 50 – 70     | 880 - 1120 |
| Bélgica        | 7,5 - 34,7  | 735 - 3359 |
| Dinamarca      | 2,3 - 10,7  | 440 - 2010 |
| Itália         | 35 – 40     | 600 - 690  |
| Alemanha       | 79 – 300    | 963 - 3658 |
| Japão          | 99          | 785        |
| Portugal       | 3,2         | 325        |
| Brasil         | ---         | 230 - 660  |

### 2.2.2. Composição e classificação do RCD

As composições do RCD, além de ter uma variabilidade de acordo com a origem, podem variar de acordo com o nível de desenvolvimento técnico da construção civil, disponibilidade de materiais e desenvolvimento econômico de cada região (OLIVEIRA, et al, 2004 apud ULSEN, 2006). Nas Figuras 2.1 e 2.2 estão representadas as composições dos resíduos gerados na Holanda e Japão, respectivamente.

Devido às diferenças nos processos construtivos, materiais empregados e técnicas construtivas, pode-se perceber no resíduo inglês, americano e australiano uma grande quantidade de resíduos de madeira (HARDER; FREEMAN, 1997; EPA, 1998, QUEENSLAND, 2003 apud ULSEN, 2006).

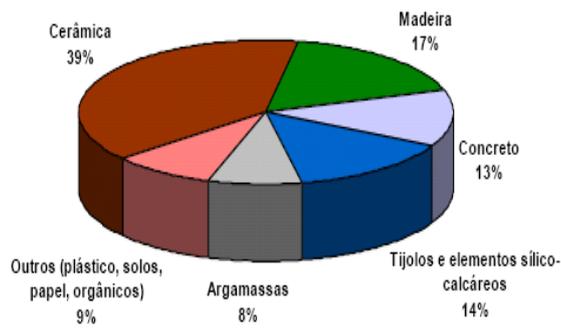


Figura 2.1: Composição do resíduo de construção civil gerado na Holanda  
Fonte: Bossink; Browsers, 1996 apud ULSEN (2006)

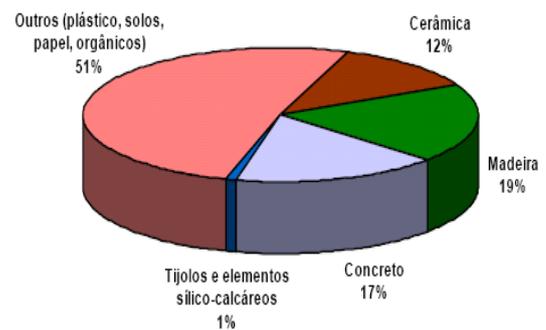


Figura 2.2: Composição do resíduo de construção civil gerado no Japão  
Fonte: HONG KONG POLYTECHNIC, 1993, apud Levy (1997) apud Ulsen (2006)

Segundo John (2005), o RCD tem uma composição básica, que pode ser classificada em solos, materiais “cerâmicos”, materiais metálicos e materiais orgânicos. Os materiais “cerâmicos” são as rochas naturais, o concreto, argamassas a base de cimento e cal, resíduos de telhas e tijolos de cerâmica vermelha, revestimentos, componentes de gesso, vidros e cimento amianto. Os materiais metálicos são compostos por aço, proveniente de concreto armado, latão e chapas de aço. E os materiais orgânicos se compoem de madeira, plásticos, papéis, tintas, adesivos, produtos provenientes da limpeza de terrenos, materiais betuminosos como asfalto, alcatrões, óleos graxos, entre outros.

Ainda segundo John (2005), a fração cerâmica é predominante nos resíduos de construção no Brasil (ver Tabela 2.4), e em seguida vem o solo, porém o autor ressalva que a proporção entre os materiais em cada classificação é muito variável e depende principalmente da origem desse resíduo.

Tabela 2.4: Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga, São Paulo (BRITO FILHO, 1999)

| Material Total (%) |    | Material da Fração Cerâmica (%) |    |
|--------------------|----|---------------------------------|----|
| Solos              | 32 | Concreto                        | 13 |
| Cerâmicos          | 63 | Argamassas                      | 40 |
| Outros             | 5  | Cerâmicas                       | 47 |

Segundo Ulsen (2006), o RCD pode ser dividido em dois tipos: o tipo I ou cinza e o tipo II ou vermelho. No tipo I predominam os concretos e argamassas e no tipo II os componentes de construção de cerâmica vermelha. Nas figuras 2.3 e 2.4 estão representados os tipos de resíduos.



Figura 2.3: RCD cinza da usina de Itaquera  
Fonte: Ulsen (2006)



Figura 2.4: RCD vermelho da usina de Itaquera  
Fonte: Ulsen (2006)

N

Segundo Grubba (2009), o resíduo de construção civil de Salvador apresenta em sua composição mais da metade do total representado por concretos e argamassas. Na figura 2.5 estão representadas as composições dos resíduos gerados em Salvador/BA.

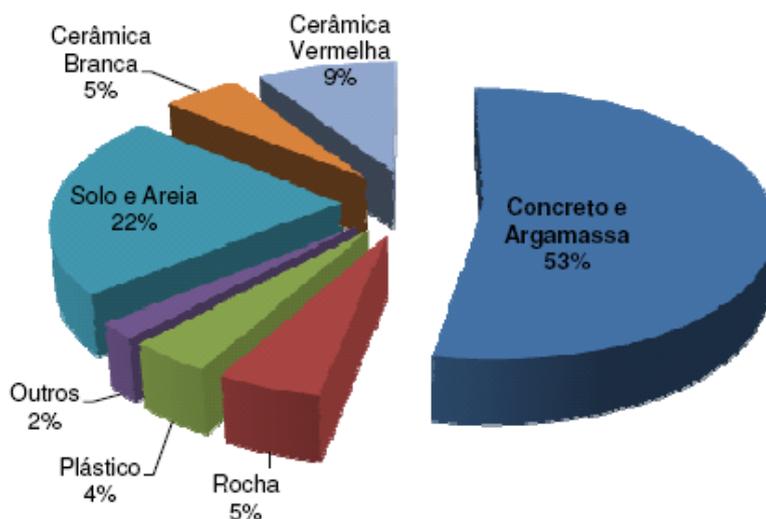


Figura 2.5: Composição do resíduo de construção civil gerado em Salvador/BA  
Fonte: Grubba (2009)

### 2.2.3. Gestão de RCD

A maior dificuldade na gestão do RCD é a sua deposição final, pois apesar da baixa periculosidade do material, os impactos provocados pela gestão inadequada dos resíduos são de ordem ambiental, social e econômica (ULSEN, 2006).

Ainda segundo Ulsen (2006), áreas de aterro clandestinas podem provocar assoreamento de rios, entupimento de bueiros, degradação de áreas urbanas, proliferação de animais peçonhentos e problemas de saúde pública. Há também custos elevados para coleta, transporte e deposição final destes resíduos (ULSEN, 2006).

Segundo Santos (2008), a gestão de RCD tem como objetivo a redução de custos com limpeza urbana, transporte e deposição final, a preservação ambiental e redução de geração de resíduos nas atividades construtivas.

Segundo a Resolução nº 307 do CONAMA, os projetos de gerenciamento implantados nos canteiros de obras, visam à segregação dos resíduos, de acordo com a classe e a destinação adequada para cada tipo de material. Desta forma, cabe ao gerador dos resíduos a responsabilidade de fazer a triagem, o acondicionamento e o transporte desses resíduos.

De acordo com a Resolução nº 307 do CONAMA, os geradores dos RCD devem ter como principal objetivo a não geração de resíduos e, em segundo plano, a redução, reutilização e reciclagem dos resíduos de construção.

A criação de modelos de gestão de RCD faz-se necessária, através de instrumentos legais ou através de diretrizes de cada município, tendo em conta a organização e orientação do setor no que diz respeito à melhor destinação dos resíduos (SANTOS, 2008).

#### **2.2.4. Impactos Ambientais Gerados pelos RCD**

O impacto ambiental aparece definido na Resolução nº 001 do CONAMA, de 23 de setembro de 1986 como:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem estar da população, as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986).

No processo construtivo, todas as etapas causam impactos ambientais que afetam a saúde, a segurança, o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, o ecossistema, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais (PIOVEZAN JÚNIOR, 2007). Segundo John (2005), o consumo de matérias primas naturais pela construção civil gira em torno de 15% a 50%.

Os resíduos de construção e demolição podem conter contaminantes, dependendo do uso que foi dado às construções, que podem comprometer a qualidade técnica do posterior uso do resíduo, também podendo promover riscos ambientais (JOHN, 2005).

Segundo John (2005), os resíduos de construções em áreas de influência marinha podem conter sais e provocar posterior corrosão de armaduras em concreto armado. Resíduos provenientes de construções industriais podem conter contaminantes que variam do tipo de atividade que foi desenvolvida durante o uso da construção.

O principal problema ambiental gerado pelos RCD é a destinação final. Áreas ilegais de depósito são responsáveis por enchentes, vetores de doenças, pela degradação do ambiente urbano, contaminação do solo. A deposição de resíduos em aterros podem ainda provocar problemas futuros nas construções erigidas nestas áreas (JOHN, 2005).

Tabela 2.5: Ocorrência de vetores em áreas de deposição de RCD em São José do Rio Preto (1996) Fonte: Adaptado de Pinto, 1999

| <b>Vetores</b>                           | <b>Incidência (%)</b> |
|--|-----------------------|
| Pulgas, carrapatos, piolhos e percevejos | 51,3                  |
| Escorpiões                               | 25,7                  |
| Ratos                                    | 9,5                   |
| Baratas                                  | 8,1                   |
| Moscas                                   | 5,4                   |

## **2.2.5. Legislação vigente**

### *2.2.5.1. Resolução CONAMA*

Segundo a Resolução CONAMA 307 de 2002, os resíduos de construção e demolição são definidos da seguinte forma:

Resíduos da construção civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (Resolução 307 de 2002, CONAMA, art. 2).

A Resolução CONAMA nº 307 de 2002, foi alterada pelas Resoluções CONAMA 348 de 2004, 431 de 2011 e 448 de 2012, no que diz respeito às destinações dos resíduos de gesso que, de resíduos classe C, passaram a resíduos de classe B, a qual engloba os materiais recicláveis para outras destinações. Segundo a Associação Brasileira do Drywall (2012), o gesso pode ser utilizado como aditivo agrícola, na fabricação de cimento e como aditivo na produção de sínter em indústrias siderúrgicas. A resolução não especifica como o resíduo de gesso pode ser reciclado, mas enfatiza que o resíduo de gesso deve ser reciclado, e não mais ser enviado para aterros.

Sendo o RCD um produto gerado durante a construção, a sua composição está diretamente ligada às características da sua fonte geradora, ou seja, das obras de construção existentes num determinado local.

A composição e a qualidade dos RCD dependerão do nível de desenvolvimento da indústria de construção, dos materiais utilizados e desenvolvimento de obras específicas que gerem a utilização de materiais especiais. Caso o desenvolvimento de indústria de construção seja maior ou menor os materiais serão também mais ou menos diversificados, produzindo mais ou menos RCD. A construção de infraestruturas diversificadas, como as grandes obras públicas (pontes, tuneis, restauração, entre outros) poderão originar resíduos com características diferentes dos tradicionais.

## 2.3. CENTRAIS DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Segundo Lima (1999), a maioria das centrais instaladas possuem equipamentos e funcionamentos simplificados e utiliza apenas alimentador, britador, transportador de correia e eletroímã no processamento dos resíduos.

Os equipamentos mais utilizados na reciclagem de resíduos de construção e demolição são derivados do setor de mineração, com algumas adaptações ou utilização direta no processo de beneficiamento dos resíduos de construção e demolição (LIMA, 1999). O procedimento básico de beneficiamento consiste em britar o resíduo para obtenção de agregado nas dimensões desejadas (HANSEN, 1992).

### 2.3.1. Centrais no exterior

Segundo De Paw & Lauritzen (1994) apud Lima (1999), nos anos de 1990 os países europeus possuíam em torno de 600 unidades de beneficiamento de resíduos de construção e demolição. Atualmente, este número ultrapassa.

A Tabela 2.6 apresenta informações sobre a quantidade de recicladoras em operação em países europeus no ano de 1992.

Tabela 2.6: Recicladoras de resíduos, em 1992  
Fonte: Associação Europeia de Demolição, apud DE PAUW & LAURITZEN, 1994

| <b>País</b>  | <b>Unidade de beneficiamento</b> |
|--------------|----------------------------------|
| Bélgica      | 60                               |
| Dinamarca    | 20                               |
| França       | 50                               |
| Alemanha     | 220                              |
| Holanda      | 70                               |
| Itália       | 43                               |
| Grã-Bretanha | 120                              |

### 2.3.2. Centrais no Brasil

A primeira unidade de reciclagem de RCD instalada no Brasil deu-se em

1991, em São Paulo (SP). Desde então, muitos municípios instalaram unidades de reciclagem como resultado de planos de gestão dos RCD (PINTO, 1999).

Segundo Pinto (1999), o sucesso obtido por algumas instalações brasileiras, pelo volume de material que vem processando e pelo impacto ambiental que eliminam, é o fato de terem sido originadas de processos iniciados com quantificações precisas, reconhecimento de fluxos e atores inseridos, ou seja, um diagnóstico bem elaborado. Na Figura 2.6 é possível analisar o número de usinas de reciclagem de RCD de classe A inauguradas ao longo dos anos.

Em Belo Horizonte foi realizado um programa de monitoramento da emissão de ruído e de pó na primeira central instalada, chegando a resultados satisfatórios que comprovaram a eficácia das medidas adotadas. Na implantação das centrais de reciclagem em Ribeirão Preto e São José dos Campos os relatórios de monitoramento de Belo Horizonte foram utilizados junto aos órgãos de regulamentação ambiental para eliminar-se a necessidade de Estudos de Impacto Ambiental e para a obtenção das licenças de funcionamento (LIMA, 1999).

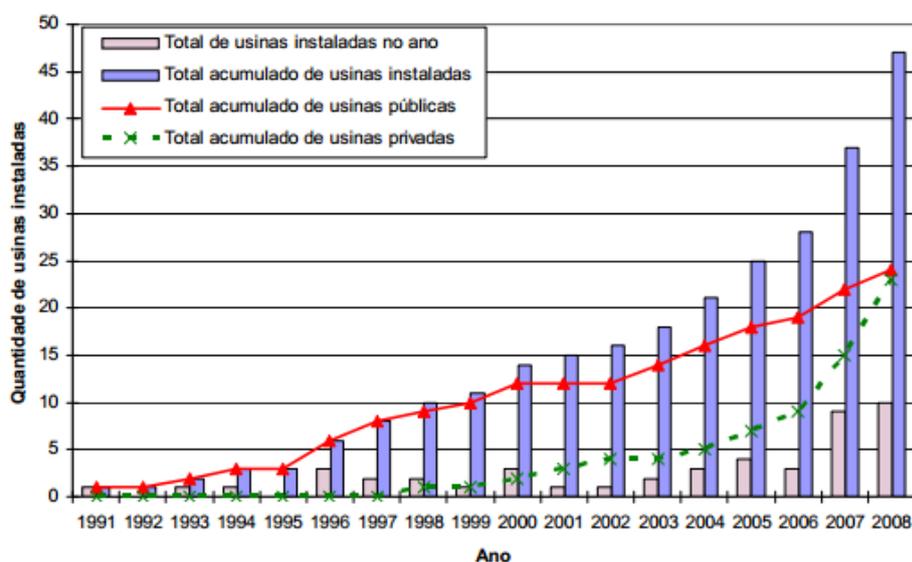


Figura 2.6: Usinas de reciclagem  
Fonte: Miranda et al, 2009

### 2.3.3. Centrais em Pernambuco

#### 2.3.3.1. Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina

Na Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina, de onde foi proveniente o material utilizado no presente trabalho, o processo de beneficiamento se inicia com o recolhimento do RCD por caminhões nas obras. Posteriormente o resíduo é estocado em pilhas, no pátio da usina, onde recebe uma separação manual inicial de materiais como madeira, plástico e gesso (Figura 2.7).



Figura 2.7: Central de tratamento de resíduos de Petrolina/PE

A usina tem capacidade de processamento de 20 toneladas/hora de resíduos de construção. Os resíduos beneficiados têm como principal destino o uso em base e sub-base de pavimentação de estradas, agregados para uso em pré-moldados, argamassas e concretos (SANTOS, 2008).

De acordo com PAULA (2010), o resíduo encontrado na cidade de Petrolina e processado pela CTR é composto por: 45,5% de material cerâmico, 23,6% de argamassa, 14,1% de concreto e 8% de areia. Os demais materiais que estão presentes em menor porcentagem encontram-se descritos na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Composição gravimétrica do RDC de Petrolina  
Fonte: Adaptado de PAULA (2010)

| <b>Materiais</b> | <b>Percentual de material por amostra (%)</b> |
|------------------|---|
| Cerâmica         | 45,5  |
| Argamassa        | 23,6  |
| Concreto         | 14,1  |
| Areia            | 8,0   |
| Madeira          | 2,0   |
| Plástico         | 5,0   |
| Gesso            | 6,3   |

### 2.3.3.2. Ciclo Ambiental

A usina de beneficiamento de RCD Ciclo Ambiental (Figura 2.8) está localizada em Camaragibe, município da região Metropolitana do Recife, possui capacidade para beneficiar 3.500 a 4.500 toneladas de RCD por mês (MACEDO, 2010).

Os resíduos provenientes de obras de construção civil da RMR passam por uma pesagem inicial, antes do beneficiamento, para controle de produção, estocagem e atribuição de tarifa do material.



Figura 2.8: Usina de beneficiamento de RCD Ciclo Ambiental  
Fonte: MACEDO, 2010

Posteriormente os resíduos são triados e britados (Figura 2.9), sendo transformados em agregados reciclados, de acordo com granulometria especificada.



Figura 2.9: Processamento de RCD  
Fonte: MACEDO, 2010

## 2.4. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A reciclagem de RCD, do ponto de vista ambiental, permite a diminuição do consumo de recursos naturais na construção permitindo uma maior vida útil das reservas naturais e diminuição dos impactos negativos do setor de atividade no meio ambiente, provocando até a redução das quantidades depositadas de forma irregular e o volume dessa tipologia de resíduo em aterros. Do ponto de vista técnico, o uso dos resíduos beneficiados varia de acordo com a composição deste resíduo (JOHN, 2005).

Há ainda vantagens econômicas ligadas à diminuição das despesas na remoção das áreas de deposição clandestina. É possível também apresentar vantagens ligadas à geração de empregos e o aumento da competitividade da economia (EPA, 1998, *apud* JOHN, 2000, p.30). A utilização de resíduos poderia permitir a produção de materiais com melhores características técnicas, através de estudos aprofundados na área.

Atualmente muitas são as hipóteses de reutilização e de reciclagem dos RCD. Segundo a Resolução nº 307 do CONAMA as definições de reutilização e de reciclagem são:

Reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo; Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação (RESOLUÇÃO nº 307, CONAMA).

### 2.4.1. Aterros

O aterro é a utilização mais frequente do RCD. No entanto, os aterros muitas vezes são executados sem qualquer beneficiamento ou controle, de formas inadequadas. Dessa maneira, uma prática que poderia ser bastante benéfica ambientalmente, torna-se a grande responsável por impactos ambientais negativos como o aterro de mangues, lagoas, entre outros.

De acordo com Lima (1999) o agregado reciclado apresenta bom comportamento quando compactado e aplicado sobre o solo, formando uma camada

coesa e mais resistente a danos que o solo natural utilizado para este fim. Na Figura 2.10 tem-se execução de aterro com RCD.



Figura 2.10: Execução de aterro  
Fonte: Pinto, 1999

#### 2.4.2. Pavimentação

Segundo Piovezan Junior (2005) devido à padronização do uso do agregado na execução de camadas de pavimentação pela a ABNT, através da NBR 15.115:2004, a utilização para a pavimentação já apresenta consolidação da tecnologia de reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição.

Zordan (2006) diz que esta é a mais simples utilização para o resíduo de construção, podendo ser aplicados os diversos produtos da reciclagem de resíduos para reforço de subleito, sub-base e base (Figura 2.11).



Figura 2.11: Revestimento de via com agregado reciclado  
Fonte: <http://encontrocomprefeitos.portalfederativo.gov.br/principal.php>  
acesso em março de 2013

Atualmente a pavimentação mostra-se como a principal utilização de resíduos de construção beneficiados, devido ao desempenho técnico satisfatório e a baixa exigência de qualidade, porém esta atividade não consegue absorver toda a quantidade de resíduos gerados (ULSEN, 2006).

As principais vantagens para a utilização de RCD na pavimentação são: utilização de quantidade significativa de material reciclado, tanto na fração miúda, quanto na graúda; simplicidade dos processos de execução do pavimento e de produção do agregado reciclado, contribuindo para a redução dos custos e a difusão dessa forma de reciclagem; possibilidade de utilização dos diversos materiais componentes do entulho; e utilização de parte do material em granulometrias graúdas reduzindo o consumo de energia necessária para a reciclagem do RCD (ZORDAN, 2006).

Grubba (2009) descreve a construção de uma via experimental construída em Goiânia/GO com a utilização nas camadas de base e sub-base de uma mistura de agregados reciclados e solo natural. Após a liberação para o tráfego de veículos a via passou a ser monitorada e com o passar dos anos a pista não apresentou defeitos superficiais nem deformações que comprometam a estrutura da via, demonstrando que os agregados reciclados estão aptos a serem utilizados em estruturas de pavimentação.

Proença (2012) diz que o material estudado em sua pesquisa atende as recomendações da NBR 15115 para pavimentação com utilização de RCD, com amostras que podem ser utilizadas para aplicação em base de vias de baixo volume de tráfego, e amostras para aplicação em camadas de sub-base e reforço de subleito. O autor concluiu que se mostra viável a utilização de RCD, porém ressalta que deve ser feito um controle rigoroso no beneficiamento destes resíduos, assim como na execução das obras de pavimentação e no uso da via, no sentido de evitar o tráfego de veículos não permitidos, que causariam desgaste e afundamento na via (PROENÇA, 2012). Na tabela 2.8 encontram-se resumidas algumas das aplicações de RCD citadas pelo autor em sua pesquisa.

Tabela 2.8: Resumo de aplicações de utilização de RCD  
 Fonte: Adaptado de Proença (2012)

| <b>Local</b> | <b>Aplicação</b>   | <b>Observação</b>   | <b>Fonte</b>                                 |
|--------------|--|---|--|
|              | Em camadas de drenagem, de pavimentação e em melhoramento de solos.                | Possibilidade de estabilizar solos expansíveis.   | Brito Filho (1999)                           |
|              | Fabricação de peças pré-moldadas de concreto sem função estrutural e em argamassa. | Viabilidade em concreto sem função estrutural   | Lima (1999)                                  |
|              | Fabricação de concreto sem função estrutural.                                      | Viabilidade em concreto sem função estrutural.  | Rodrigues (2011)                             |
|              | Análise da variabilidade do agregado de RCD para uso em argamassas e concreto.     | Viabilidade em todas as propriedades analisadas   | Angulo (2000)                                |
| Brasil       | Novas rodovias e recuperação de antigas (400 km)                                   | ---   | Dias (2004)                                  |
|              | Em reforço de solos  | Viabilidade em uso de reforço de solos  | Santos (2007)                                |
|              | Estaca de compactação  | Viabilidade em uso de reforço de solos  | Lira Jr. (2010)                              |
|              | Em vias de baixo volume de tráfego.  | Viabilidade em propriedades de pavimentação analisadas                                      | Fernandes (2004), Motta (2005), Leite (2007) |
|              | Construção de via rodoviária   | Comportamento mecânico do agregado reciclado  | Grubba (2009)                                |
| Europa       | Em reforço de solos  | Viabilidade em uso de reforço de solos  | Santos (2007)                                |
| Holanda      | Estaca de compactação  | Viabilidade em uso de reforço de solos  | Lira Jr. (2010)                              |
| Itália       | Em vias de baixo volume de tráfego.  | Viabilidade e aplicação dos agregados reciclados em propriedades de pavimentação analisadas | Fernandes (2004), Motta (2005), Leite (2007) |

### 2.4.3. Produção de concreto e seus componentes

Rodrigues (2011) analisou o uso de agregados reciclados para produção de concretos sem função estrutural, e concluiu em sua pesquisa que o uso para concretos sem função estrutural é viável e não apresenta grandes alterações nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos.

Lima (1999) destaca a necessidade de observar a alta taxa de absorção de água dos agregados reciclados e a aplicação do concreto produzido com este agregado, devendo ser tomados cuidados para evitar problemas como aumento das espessuras e redução da distância entre juntas.

Na Tabela 2.9 encontram-se resumidas as recomendações para uso de agregados reciclados em concretos (ANGULO, 2005).

Tabela 2.9: Recomendações para uso de agregados reciclados em concretos  
Fonte: Adaptado de Ângulo (2005) \*Classes de exposição (ENV 206)

| Normas      | fck    | Natureza do agregado | Condições de exposição  | Aplicação                       |
|-------------|--------|----------------------|-------------------------|---------------------------------|
| BSCJ        | 18     | Concreto             |                         | Fundações                       |
|             |        | Alvenaria            |                         | Edifícios comerciais térreos    |
| Holanda     |        | Concreto             | Pouca umidade           | Sem restrição                   |
|             |        | Alvenaria            |                         |                                 |
| RILEM       | 0 a 60 | Concreto             | 2, 3 e 4*               | Sem restrição                   |
|             | 6 a 20 | Alvenaria            | 1*                      | Sem restrição                   |
| LIMA (1999) | 6      | Concreto             | Sem presença de umidade | Contrapisos/bases/vergas/blocos |
|             | 2      | Alvenaria            | Sem presença de umidade | Contrapisos/bases/vergas/blocos |

\*Classes de exposição

De acordo com a normatização japonesa B.S.C.J. (Building Contractors Society of Japan), apenas resíduos de concreto estrutural podem ser utilizados na produção de concreto estrutural. Já a RILEM estabelece que para concretos de resistência entre 50 e 60 Mpa, os agregados reciclados só podem ser de resíduos

de concretos e os concretos de baixa resistência, de 18 a 20 Mpa, podem ser produzidos com agregados reciclados de alvenaria (ANGULO, 2005).

Segundo Lima (1999), componentes pré-moldados como tijolos maciços, blocos (Figura 2.12), briquetes, tubos e meio-fio podem ser produzidos através de concretos com adições de agregados reciclados. Devem, contudo ser analisadas as características dos agregados e sua influência na durabilidade do concreto produzido.



Figura 2.12: Uso de blocos de concreto fabricados com agregado reciclado em pavimentação  
Fonte: <http://encontrocomprefeitos.portalfederativo.gov.br/principal.php>  
acesso em março de 2013

Foi também testada a possibilidade de utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais de construção, verificando a sua viabilidade para utilizações variadas como o enchimento de blocos vazados cerâmicos e de concreto; na forma de compósito resíduo e cimento para a aplicação como forro e divisórias, entre outras (NOLASCO, 1993).

Outra utilização possível é, através de resíduo sólido gerado pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila, a confecção de tijolos e blocos vazados (PABLOS, 1995).

Aragão (2007) utiliza concretos reciclados para a produção de lajes pré-moldadas. No seu estudo foi observado que o comportamento das lajes com concretos reciclados foi bastante semelhante ao comportamento das lajes de concretos convencionais, demonstrando a viabilidade técnica para o uso de resíduos na produção de elementos de concretos estruturais de média resistência.

#### **2.4.4. Melhoramento de solo com estacas de compactação**

Os ensaios realizados no estudo de Lira (2010) comprovam o desempenho satisfatório das estacas para melhoramento de solos, produzidas com RCD, quando comparadas com as estacas convencionais de pó de pedra. Todas as amostras de RCD do estudo apresentam resistência e ângulo de atrito superior às amostras de pó-de-pedra. Com isso o autor conclui que o resíduo analisado pode ser utilizado em substituição ao pó-de-pedra na execução de estacas de compactação.

#### **2.4.5. Argamassas**

Segundo Lima (1999), a utilização de argamassas de assentamento com material reciclado confere boa resistência mecânica e aderência ao compósito na sua aplicação. Pela alta taxa de absorção do reciclado não se indica o uso de argamassas com o material em locais sujeitos a umidade ou onde é necessária impermeabilização. O autor também diz que a aplicação de argamassa com reciclado pode ser feita no revestimento de superfícies e emboços, porém não aconselha a utilização em chapiscos, rebocos e assentamento de revestimentos cerâmicos.

Silva et al (2008) em seu estudo de utilização de resíduo de tijolo da indústria cerâmica e da indústria da construção, para aplicação em argamassas de reboco, conseguiu resultados satisfatórios e até superiores às argamassas com agregados naturais. Os autores fazem uma ressalva apenas para a argamassa com substituição total da areia por resíduos cerâmicos, pois esta apresentou nas características estudadas, desempenhos inferiores à argamassa de referência.

#### **2.4.6. Camadas drenantes**

Segundo Lima (1999), para aplicação em camadas drenantes, o resíduo utilizado deve ter grãos de boa resistência mecânica, sem a possibilidade de se desintegrar com a exposição à umidade.

Os ensaios de permeabilidade realizados por Affonso (2005) mostraram que o resíduo analisado possui permeabilidade satisfatória para utilização em camadas drenantes de aterros sanitários, com valores encontrados superiores ao necessário para atender a vazão diária de chorume presente no aterro.

#### **2.4.7. Gabião**

A utilização de resíduos de construção em gabiões (Figura 2.13) para contenção de taludes é possível, porém devem ser tomados cuidados como o diâmetro dos grãos e das telas da gaiola do gabião, bem como a resistência dos grãos (LIMA, 1999).



Figura 2.13: Gabião preenchido com RCD

Fonte: <http://encontrocomprefeitos.portalfederativo.gov.br/principal.php>  
acesso em março de 2013

#### **2.4.8. Estruturas de solo reforçado**

Num estudo realizado por Santos (2007), o autor avaliou o potencial de uso de RCD-R em estruturas de solo reforçado (ESR) com geossintéticos, por meio da caracterização das propriedades geotécnicas do RCD, da realização de ensaios de pH, e da execução de ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento de geogrelhas.

Os resultados de Santos (2007) revelaram que os ensaios de caracterização do RCD-R apresentaram baixa variabilidade nas propriedades do material e que o mesmo atendia às recomendações das normas BS 8006 (1995) e FHWA (2001) para a execução de estruturas de solo reforçado. Nos ensaios de pH, os extratos

aquosos dos RCD-R ensaiados eram alcalinos e atendiam às recomendações sugeridas por Anderson et al. (1992) para aplicações com geogrelhas de poliéster.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto de grande porte demonstraram que o RCD possuía excelente comportamento mecânico, o que possibilitaria a sua utilização não só em estruturas de solo reforçado, mas também em outros tipos de obras geotécnicas.

Ainda segundo o autor, observando os resultados dos ensaios de arrancamento de geogrelha, verificou-se que o RCD apresentou desempenhos superiores aos de areia lavada de construção (utilizada como referência pelo autor), mesmo esta sendo o material recomendado pela FHWA (2001) para execução de obras públicas nos Estados Unidos da América.

Macedo (2010) realizou um estudo sobre reforço de um solo com fibras e agregado reciclado para melhorar a qualidade das obras de pavimentação, concluindo que o agregado reciclado e as misturas com a adição de fibras apresentam características físicas e mecânicas que permitem seu uso na construção de bases rodoviárias e podem substituir os materiais convencionais.

#### 2.4.9. Reabilitação de pavimentos

Segundo Vendroni (2012), o RCD pode ser utilizado em fechamentos de valas abertas (Figuras 2.14 e 2.15) para serviços em tubulações de água e esgotos, e reabilitação de pavimentos danificados (Figura 2.16).



Figura 2.14: Fechamento de vala com RCD após substituição da tubulação de água  
Fonte: Vendroni (2012)



Figura 2.15: Realização da camada de base de bica corrida com RCD  
Fonte: Vendroni (2012)

A utilização do RCD é possível, verificando-se que o pavimento não apresentou patologias após a utilização do material como fechamento para valas no município de Piracicaba/SP.



Figura 2.16: Reabilitação de pavimento danificado  
Fonte: Vendroni (2012)



Figura 2.17: Aplicação da camada final com CBUQ  
Fonte: Vendroni (2012)

O autor propôs em sua dissertação uma metodologia para a execução dos serviços de fechamento de valas de tubulações hidrossanitárias. Na figura 2.18 encontra-se um resumo das etapas do método.

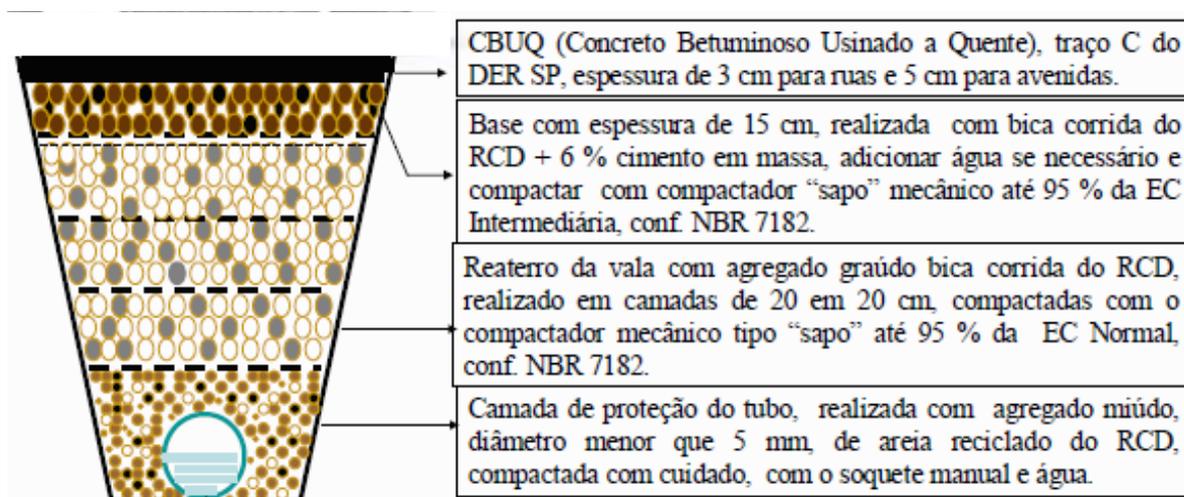


Figura 2.18: Corte do método proposto para fechamento de vala  
Fonte: Vendroni (2012)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo descrever os procedimentos realizados durante o desenvolvimento desta pesquisa, que incluem: a descrição da composição gravimétrica do resíduo proveniente da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de Petrolina, a caracterização dos materiais utilizados para a produção de concretos, com e sem a utilização de agregados reciclados, a produção de um concreto de referência e de um concreto com agregado reciclado para avaliar o comportamento mecânico, os procedimentos dos ensaios de caracterização mecânica realizados nos concretos, realizar o estudo do comportamento geotécnico do resíduo e de suas misturas com um solo de referência, para avaliar sua utilização na estabilização de solos. São descritos os equipamentos e as normas utilizadas para realização dos ensaios.

Inicialmente, no Laboratório de Materiais da UNICAP, foi realizada a separação do resíduo para a avaliação da composição gravimétrica, depois foi feita a caracterização dos materiais que foram utilizados para a produção do concreto, sendo eles brita, cimento, areia natural e resíduo utilizado como agregado reciclado miúdo. Também foi realizado um estudo de dosagem experimental de três famílias de concreto, sendo um concreto de referência e dois concretos com 50% e 100% de substituição de agregado miúdo natural pelo reciclado, sendo calculados os traços para cada família: um traço pobre (1:6,5), um traço intermediário (1:5) e um traço rico (1:3,5) em cimento. Foi estudada a granulometria, a absorção de água destes componentes, realizados ensaios de resistência à compressão, à tração por compressão diametral e flexão em viga. Também foram realizados ensaios não destrutivos de ultrassom e esclerometria.

Posteriormente, os estudos continuaram no Laboratório de Geotecnia da UNICAP, com o estudo do comportamento geotécnico do resíduo e de misturas com as proporções de 25% de solo natural mais 75% de resíduo, 50% de solo natural mais 50% de resíduo e 75% de solo natural mais 25% de resíduo, para a análise na utilização para estabilização de solos. Foram realizados os ensaios de granulometria e limites de consistência, compactação, CBR e adensamento para cada proporção de misturas, bem como para o resíduo e para o solo natural.

### 3.1. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA E BENEFICIAMENTO DO RCD PROVENIENTE DE PETROLINA/PE

#### 3.1.1. Composição gravimétrica

A determinação da composição gravimétrica mostra-se necessária para o estudo do resíduo, pois através dela podemos avaliar a influência que cada material tem na composição dos concretos produzidos, seja na resistência mecânica deste concreto ou no aumento do consumo de água para a produção de concreto com agregado miúdo reciclado. Primeiro todo o material foi separado de acordo com a sua natureza e posteriormente pesado cada fração do material. A partir dos resultados das pesagens foi obtida a porcentagem em massa de cada material constituinte da amostra, conforme figura apresentada no capítulo de resultados e discussões (Figura 4.1).

#### 3.1.2. Etapas de beneficiamento do resíduo

Os trabalhos de beneficiamento foram conduzidos sob a supervisão da Prefeitura Municipal de Petrolina/PE e os resíduos foram provenientes de RCD recolhido nas obras locais. A composição deste material contém resíduos de escavações, resíduos de demolições de concreto simples e armado, resíduos de alvenaria cerâmica e de blocos de concreto, de revestimentos de argamassa e cerâmica.

No processo de preparo, o RCD recolhido por caminhões nas obras passa por uma sequência de atividades realizadas na Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina /PE, onde o resíduo é:

- estocado no pátio da usina de reciclagem (figura 3.1);
- passa por uma separação manual;
- vai para uma grade separadora que retira os materiais finos e contaminantes (figura 3.2);
- após a retirada de materiais finos e contaminantes, o produto restante passa por aspersões (figura 3.3);

- é levado a um britador de mandíbulas (figura 3.4), onde é triturado;
- o processo de beneficiamento prossegue com um curso do material sobre esteiras rolantes que circula sob uma estação imantada (figura 3.5) onde são removidos resíduos ferrosos;
- o material segue, então, para uma seleção em peneiras vibratórias, e por fim separados, de acordo com sua granulometria.

A partir deste ponto, o material beneficiado foi colocado em sacos de nylon e transportado em caminhão até o laboratório de Materiais de Construção da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), em Recife/PE. Para esta pesquisa foram coletadas 60Kg de RCD.



Figura 3.1: Usina de Reciclagem



Figura 3.2: Vibração na grade separadora



Figura 3.3: Grade de separação de finos com aspersores



Figura 3.4: Britador de mandíbulas



Figura 3.5: Recolhimento de materiais ferrosos

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO

Os ensaios de caracterização realizados no Laboratório de Materiais da UNICAP avaliaram os materiais constituintes do concreto, como cimento, areia e brita, e o resíduo proveniente Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina/PE.

Foram confeccionados corpos de prova de concretos para analisar sua utilização em muros de arrimo, sendo um traço para o concreto de referência e dois traços para os concretos com incorporação de agregado miúdo reciclado, um traço com substituição de 50% do agregado convencional por agregado reciclado outro traço com 100% de substituição de agregado miúdo convencional por agregado miúdo reciclado.

Os corpos de prova de concreto foram dosados e confeccionados no Laboratório de Materiais da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), variando-se o consumo de cimento e as adições e substituições de agregados reciclados. Também foram realizados ensaios para avaliação de características físicas e mecânicas, como ensaios de ultrassom, esclerometria, resistência à compressão simples e diametral para avaliar a utilização em estruturas de contenção em concreto.

Os materiais analisados e utilizados para a produção do concreto foram: cimento CP II – F, areia natural, agregado reciclado de resíduo da construção e demolição e brita com dimensão de 25 mm. Estes materiais foram submetidos a ensaios de caracterização, tais como, análise granulométrica, massa específica e teor de materiais finos, conforme apresentado na Tabela 3.1, e os resultados dos ensaios estão apresentados no item 4.2 do Capítulo 4. Os ensaios de caracterização do cimento Portland utilizado encontram-se resumidos na Tabela 3.2 e os resultados destes ensaios são apresentados no item 4.2 do Capítulo 4.

Nos concretos produzidos variou-se o consumo de cimento e a utilização de agregado miúdo reciclado, sendo no traço 50 utilizado 50% de agregado reciclado miúdo e 50% de agregado miúdo convencional e no traço 100, substituiu-se o agregado miúdo convencional por agregado miúdo reciclado.

Tabela 3.1: Normas e ensaios realizados

| Ensaio  | Areia | Agregado miúdo reciclado | Brita |
|---|-------|--------------------------|-------|
| Granulometria (NM 248:2003)                                   | x     | x                        | X     |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) - ABNT NBR NM 52 (2002) | x     | x                        | X     |
| Massa unitária (g/m <sup>3</sup> ) - ABNT NMR 7251 (1982)     | x     | x                        | X     |
| Módulo de finura  | x     | x                        | X     |
| Diâmetro máximo   | x     | x                        | x     |
| Teor de materiais finos* - ABNT NBR NM 46 (2003)              | ---   | x                        | ---   |
| Absorção de água NBR NM 30 (2000)                             | x     | x                        | ---   |

\* Fração passante na peneira # 0,075 mm antes chamado de teor de materiais pulverulentos, sendo esta a denominação dada pela NBR 7219:1987.

Tabela 3.2: Normas e ensaios realizados do cimento utilizado

| Ensaio                             | Cimento |
|------------------------------------|---------|
| Finura # 75 µm - NBR 3433 (1991)   | x       |
| Finura Blaine - NBR 7224 (1984)    | x       |
| Início de Pega - NBR 3434 (1991)   | x       |
| Fim de Pega - NBR 3434 (1991)      | x       |
| Resistencia 3d - NBR 7215 (1996)   | x       |
| Resistencia 7d - NBR 7215 (1996)   | x       |
| Resistencia 28d - NBR 7215 (1996)  | x       |
| Expansibilidade - NBR 3435 (1991)  | x       |
| Massa específica - NBR 6474 (1984) | x       |

### 3.3. DOSAGEM EXPERIMENTAL

Nesta pesquisa foi adotado o método de dosagem IBRACON (MEHTA & MONTEIRO, 2008) para a confecção dos concretos. Inicialmente, foi fixado o abatimento em 100±20 mm, porém após várias tentativas para alcançar a trabalhabilidade proposta, optou-se por deixar livre este valor, devido à heterogeneidade do resíduo em questão, sem a necessidade de aumentar o consumo de água. A relação água/cimento dos traços foi fixada em 0,50 e mantida

para todos os traços produzidos. Os traços desenvolvidos e o consumo de materiais estão especificados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Consumo de materiais por traço de concreto

|                   | Traço R     | Traço 50%   | Traço 100%       |
|-------------------|-------------|-------------|------------------|
| Traços (1:ad:a:b) | 1:1,58:2,99 | 1:1,41:2,65 | 1:1,30:1,30:2,30 |
| Cimento (Kg)      | 5,40        | 5,79        | 5,79             |
| Areia (Kg)        | 8,54        | 4,57        | ---              |
| Brita (Kg)        | 16,14       | 17,30       | 17,30            |
| ARM (Kg)          | ---         | 4,57        | 9,15             |
| Água (Kg)         | 2,70        | 2,90        | 2,90             |
| a/c               | 0,50        | 0,50        | 0,50             |

Legenda: 1=cimento; ad=adições de RCD; a=areia; b=brita; ARM: agregado reciclado miúdo; a/c=relação água/cimento.

O ensaio de abatimento, prescrito na NM 67 (ANBT, 1998) foi realizado após as tentativas referidas anteriormente, com o concreto apresentando-se coeso, sem vazios superficiais e com queda de modo homogêneo e compactado. As Figuras 3.6 e 3.7 ilustram o ensaio de abatimento.



Figura 3.6: Ensaio de abatimento do concreto de referência



Figura 3.7: Ensaio de abatimento do concreto com agregado reciclado

### 3.4. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada no Laboratório de Materiais da UNICAP. Foram moldados, de acordo com a NBR 5738 (2003), 30 corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) com adensamento por vibração, para cada uma das amostras de concreto ensaiadas (três no total), totalizando assim 90 corpos-de-prova produzidos (Figura 3.8).



Figura 3.8: Moldagem dos corpos-de-prova

### 3.5. ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS

Foram realizados ensaios destrutivos, de resistência à compressão simples, de tração por compressão diametral e flexão em viga, e não destrutivos, de ultrassom e esclerometria. Nos ensaios não destrutivos foram utilizados os seguintes equipamentos: ultrassom PUNDIT (Figura 3.9) e esclerômetro Schmidt tipo N com energia de percussão de 2,25 NM (Figura 3.10), utilizado para casos normais de construção de edifícios e postes, segundo as recomendações da NM 78 (1996). Para os ensaios destrutivos, foi utilizada uma Prensa Hidráulica Manual com capacidade para 1000 KN, indicador eletrônico digital micro processado e bomba hidráulica manual (ver Figura 3.11).

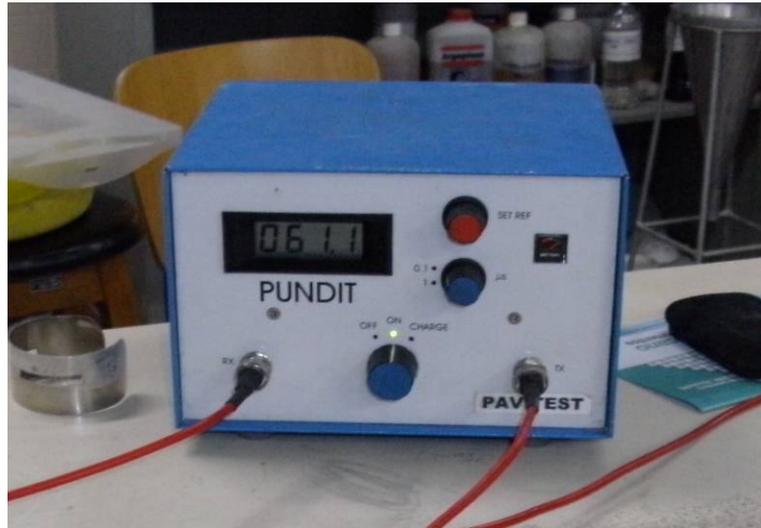


Figura 3.9: Equipamento de ultrassom



Figura 3.10: Esclerômetro de reflexão



Figura 3.11: Prensa universal

### 3.5.1. Ensaio destrutivos

#### 3.5.1.1. *Ensaio de resistência à compressão simples*

Os ensaios à compressão simples permitem comprimir corpos-de-prova com dimensões e massas previamente determinadas, com o objetivo de determinar a curva tensão-deformação do material.

Nos ensaios de resistência à compressão nos corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm), foram ensaiados 15 corpos-de-prova cilíndricos de cada traço aos 28 dias, de acordo com a NBR 5739:2007. Neste ensaio foi utilizada uma prensa universal com capacidade de 1000kN, instalada no Laboratório de Materiais da Universidade Católica de Pernambuco.

#### 3.5.1.2. *Ensaio de tração por compressão diametral*

A resistência à tração indireta foi medida no ensaio de tração por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222:94. Foram ensaiados 15 corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) de cada traço aos 28 dias. A Figura 3.12 ilustra a prensa utilizada (prensa hidráulica manual com sensibilidade de 1,96 kN e capacidade máxima de 1180 kN) nos ensaios de tração por compressão diametral.



Figura 3.12: Ensaio de tração por compressão diametral

### 3.5.1.3. Ensaio de Flexão em Viga

Foram realizados ensaios de flexão em viga com o objetivo de comparar o perfil de deformação e de ruptura das duas vigas. Para os ensaios de flexão em viga foram seguidas as recomendações da NBR 12142 (1991), que descreve a metodologia para determinação da resistência à tração na flexão do concreto, sendo realizado um ensaio usual de flexão com duas cargas concentradas igualmente espaçadas em relação aos apoios da viga.

Foram produzidas duas vigas de concreto com seção transversal quadrada de lado igual a 20 cm e comprimento igual a 2,0 m. Uma viga foi confeccionada com o concreto de referência e outra com concreto feito com 100% de agregado reciclado em substituição ao agregado convencional. Todas as vigas foram confeccionadas com a mesma armadura de flexão e cortante, sendo: uma armadura tracionada de três ferros de 8,0 mm e estribos de 4,2 mm a cada 125 mm. Não foi considerada armadura de compressão, apenas uma armadura porta estribo de dois ferros de 5,0 mm foi utilizada na face superior das vigas. As duas vigas tiveram a deflexão no centro do vão medidas através de deflectômetros digitais. A opção por confeccionar apenas uma viga com substituição de 100% de agregado natural por agregado reciclado foi considerada porque esta foi a substituição que apresentou os resultados quando comparado com o concreto de referência. A Figura 3.13 ilustra o ensaio de flexão realizado nas vigas feitas com concreto convencional e com concreto feito com agregado miúdo 100% reciclado.



Figura 3.13: Ensaio de flexão em viga

Durante o ensaio, o deslocamento foi medido no meio da vão da viga mediante utilização de deflectômetros digitais e a carga indicada representa a carga total aplicada sobre a viga (soma das cargas atuantes em cada macaco do sistema de aplicação do carregamento).

### 3.5.2. Ensaio não destrutivos

#### 3.5.2.1. Ensaio de ondas ultrassônicas

No ensaio de ondas ultrassônicas foi utilizado o equipamento PUNDIT para ensaiar 15 Corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) de cada traço, no total de 45 corpos-de-prova ensaiados aos 28 dias, segundo as recomendações da NM 58 (1996). Esta norma apresenta, além da metodologia do ensaio, o procedimento necessário para a obtenção das curvas de correlação entre velocidade de propagação de ondas e resistência à compressão.

As medições do tempo de percurso da onda através do concreto foram feitas ao longo do comprimento dos corpos-de-prova, empregando-se assim a denominada transmissão direta entre os transdutores (emissor e receptor), conforme mostrado na figura seguinte (ver Figura 3.14). Posteriormente calculou-se a velocidade de propagação da onda em cada corpo-de-prova, obtida pela média aritmética das velocidades dos corpos-de-prova ensaiados.



Figura 3.14: Ensaio de ultrassom

### 3.5.2.2. Ensaio de esclerometria

No ensaio de esclerometria foi utilizado o equipamento esclerômetro Schmidt tipo N. Foram ensaiados (Figura 3.15) 15 corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) de cada traço, no total de 45 corpos-de-prova ensaiados aos 28 dias, segundo as recomendações da NM 78 (1996). Esta norma apresenta, além da metodologia do ensaio, o procedimento necessário para a obtenção das curvas de correlação entre índice esclerométrico e resistência à compressão.



Figura 3.15: Ensaio de esclerometria

Nestes ensaios, em cada corpo-de-prova ensaiado foram feitas 9 medições. Posteriormente, os corpos-de-prova foram colocados na prensa e submetidos a uma carga de aproximadamente 15% do valor de sua carga de ruptura, conforme recomendação da NM 78 (1996). Em todos os ensaios realizados, as medições foram feitas com o aparelho na posição horizontal, com ângulo de 0°.

## 3.6. ESTUDOS DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DO SOLO COM ADIÇÕES DE RESÍDUO

O comportamento geotécnico do solo de referência e do resíduo foi estudado no Laboratório de Geotecnia da UNICAP para avaliar sua utilização na estabilização de solos. Foram realizados ensaios de Limites de Atterberg, granulometria, compactação, CBR e de compressão edométrica.

O solo natural de referência utilizado foi da área do Alto do Reservatório, no bairro de Nova Descoberta no Recife, disponibilizado pelo Laboratório de Geotecnia da UNICAP. De acordo com ALHEIROS et al. (1990), o terreno de onde foi extraído o solo é composto por sedimentos não consolidados da Formação Barreiras. LIMA (2002) diz que o solo apresenta estratificações sub-horizontais, constituídas de sedimentos que vão desde a areia às argilas e também seixos rolados.

O solo de referência foi incorporado ao resíduo nas proporções de 25%, 50% e 75% de solo, para a avaliação do resíduo e dos materiais formados nestas composições, com a intenção de se obter uma maior resistência deste material e a elevação dos valores de CBR, visando analisar a ampliação os usos do resíduo em estudo.

Nesta etapa foram realizados ensaios de Limites de Atterberg e granulometria, para o resíduo de construção e demolição (RCD) e as respectivas misturas, que para fins didáticos, convencionou chamar de mistura 1 (25% de solo natural mais 75% de RCD), mistura 2 (50% de solo natural mais 50% de RCD) e mistura 3 (75% de solo natural mais 25% de RCD).

### **3.6.1. Limites de Atterberg (limites de liquidez e plasticidade)**

No ensaio de limite de liquidez, realizado foi utilizado o aparelho de Casagrande com a finalidade de obtenção dos resultados de resistência do solo através de sua umidade. Para realização do ensaio, foi separada uma amostra de 1 Kg de RCD para peneiramento (peneira nº 40) e o ensaio procedeu de acordo com a NBR 6459:1984.

Para realização do ensaio de limite de plasticidade, separou-se uma amostra de 1 Kg de RCD para peneiramento (peneira nº 40) e o ensaio procedeu de acordo com a NBR 7180:1984.

### **3.6.2. Ensaio de granulometria**

O ensaio de granulometria, realizado de acordo com a NBR 7181:84, teve por finalidade encontrar a curva granulométrica do resíduo e das misturas 1, 2 e 3. Para realização do ensaio de granulometria, foi separada uma amostra de 1 Kg de RCD,

posteriormente peneiradas (peneira n° 10) e coletadas duas amostras de material da parte que passou pela peneira de n° 10, sendo uma de 120 g para o ensaio de sedimentação (Figura 3.16), pois se trata de um solo arenoso, e outra de 50 g para obter a umidade higroscópica do material.

De acordo com a NBR 7181:1984, as amostras foram peneiradas utilizando peneiras da série normal com aberturas inferiores a 4,8 mm usando peneiramento manual (Figura 3.17) e realizando pesagem do material em balança eletrônica.



Figura 3.16: Ensaio de granulometria: sedimentação



Figura 3.17: Ensaio de granulometria: peneiramento

### 3.6.3. Compactação

A compactação é um método de estabilização de solos que se dá por aplicação de alguma forma de energia. Nos ensaios de compactação, realizados de acordo com a NBR 7182:1986, foi aplicada energia de Proctor Normal, através de sucessivos impactos de um soquete padronizado na amostra ensaiada, sendo confeccionados e ensaiados um total de 15 corpos-de-prova.

### 3.6.4. CBR

Através do ensaio de CBR (California Bearing Ratio = Índice de Suporte Califórnia) é possível conhecer qual será a expansão de um solo sob um pavimento quando este estiver saturado, e fornecer indicações da perda de resistência do solo com a saturação.

Neste ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR 9895:1987, foi utilizada uma prensa manual de CBR (ver Figura 3.18). Foram moldados 3 corpos de prova para cada mistura, 3 para o solo natural e 3 para o resíduo, para o ensaio de compactação, com teor de umidade próximo ao ótimo, sendo ensaiados um total de 15 corpos-de-prova. Os corpos de prova foram moldados para posterior ensaio de penetração, obtendo-se simultaneamente os parâmetros de compactação e os valores de CBR.



Figura 3.18: Ensaio de CBR

### 3.6.5. Ensaio de compressão edométrica

O ensaio de compressão edométrica foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 12007:1990, com a finalidade de obter os índices de compressibilidade unidimensional das misturas de solo com resíduo, com e sem inundação do material.

Para realização deste ensaio foi utilizada uma prensa edométrica (ver Figura 3.19) devidamente equipada com edômetro (ver Figura 3.20), sendo ensaiadas duas amostras cilíndricas do solo, uma inundada e outra não inundada, para cada porcentagem de mistura (solo de referência com adições de resíduo), de acordo com as recomendações da NBR 12007:1987.



Figura 3.19: Ensaio de compressão edométrica: prensa edométrica



Figura 3.20: Ensaio de compressão edométrica: célula edométrica

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os resultados e as análises dos dados obtidos no programa experimental realizado em duas partes distintas: a análise do resíduo para utilização na produção de concretos com agregados reciclados, com ensaios realizados no Laboratório de Materiais da UNICAP e, posteriormente, a análise do resíduo para a utilização em estabilização de solos, no Laboratório de Geotecnia da UNICAP.

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO

#### 4.1.1. Composição gravimétrica

O ensaio para a composição gravimétrica do resíduo foi realizado na CTR de Petrolina e os dados fornecidos indicam que se trata de um agregado miúdo reciclado, composto de: 46% de material cerâmico, 21% de argamassa, 10% de concreto e 9% de areia. Os demais materiais que estão presentes em menor porcentagem encontram-se descritos na Figura 4.1.

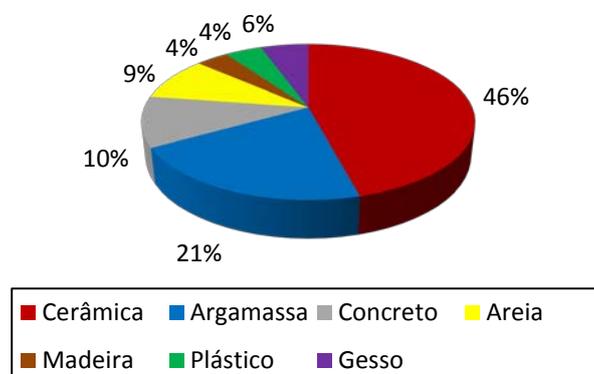


Figura 4.1: Composição gravimétrica do RCD de Petrolina

#### 4.1.2. Características físicas dos materiais constituintes do concreto

Os resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados miúdos (natural e reciclado) e graúdo (brita) são apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. A distribuição granulométrica dos materiais enquadra-se nos limites especificados na ABNT NBR 7211:2005.

Tabela 4.1: Características físicas da areia natural

| <b>Ensaio</b>   | <b>Resultados</b> |
|---|-------------------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) - ABNT NBR NM 52 (2002) | 2,65              |
| Massa unitária (g/m <sup>3</sup> ) - ABNT NMR 7251 (1982)     | 1,50              |
| Módulo de finura  | 2,07              |
| Diâmetro máximo   | 2,40 mm           |
| Teor de materiais finos ABNT NBR NM 46 (2003)                 | ---               |
| Absorção de água NBR NM 30 (2000)                             | 1,20 (%)          |

Tabela 4.2: Características físicas do agregado miúdo reciclado

| <b>Ensaio</b>   | <b>Resultados</b> |
|---|-------------------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) - ABNT NBR NM 52 (2002) | 2,50              |
| Massa unitária (g/m <sup>3</sup> ) - ABNT NMR 7251 (1982)     | 1,65              |
| Módulo de finura  | 1,90              |
| Diâmetro máximo   | 2,36 mm           |
| Teor de materiais finos ABNT NBR NM 46 (2003)                 | 12,3%             |
| Absorção de água NBR NM 30 (2000)                             | 10,5 (%)          |

Tabela 4.3: Características físicas da brita

| <b>Ensaio</b>   | <b>Resultados</b> |
|---|-------------------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) - ABNT NBR NM 52 (2002) | ---               |
| Massa unitária (g/m <sup>3</sup> ) - ABNT NMR 7251 (1982)     | 1,41              |
| Módulo de finura  | ---               |
| Diâmetro máximo   | 25,00 mm          |
| Teor de materiais finos ABNT NBR NM 46 (2003)                 | ---               |
| Absorção de água NBR NM 30 (2000)                             | ---               |

A massa específica do agregado natural foi maior em relação à do agregado reciclado, possivelmente devido aos materiais pré-existente que ficaram aderidos às

partículas do agregado reciclado, como restos de argamassa (HANSEN, 1992; LEITE, 2001 apud RODRIGUES, 2011).

O módulo de finura do agregado miúdo reciclado no valor de 1,90 (Tabela 4.2) enquadra-se na zona utilizável inferior da ABNT NBR 7211:2005, que descreve uma faixa que varia de 1,55 a 2,20. Entretanto, o módulo de finura do resíduo foi menor do que o do agregado natural, que é de 2,07 (Tabela 4.1). Segundo Leite (2001) os agregados reciclados miúdos apresentam um módulo de finura um pouco maior que os agregados naturais, devido a uma série de fatores como: granulometria específica de cada material, o tipo de britador utilizado nas centrais de beneficiamento, a extração de impurezas e a procedência do material. No presente trabalho, porém, o módulo de finura foi menor no agregado reciclado. Isto pode ter ocorrido devido à granulometria específica do resíduo, a procedência do material, com maior quantidade de resíduos cerâmicos e de argamassas.

O teor de materiais finos do agregado miúdo natural, de 12,3% mostrou-se diferente do limite máximo permitido pela NBR 7211 (2005) para agregados naturais, que não deve exceder 3% em massa.

Pesquisas realizadas por outros autores também mostraram valores divergentes para o teor de material pulverulento do limite estabelecido pela norma NBR 7211 (2005), conforme Tabela 4.4. Gomes et al. (2005) porém, ressalva que o valor satisfaz os limites da ABNT NBR 15116 (2004), que determina como limite máximo 10% para agregados graúdos e 15% para miúdos, e também se situam dentro da faixa encontrada por outros autores. Segundo Neville (1997), é aceitável o teor de materiais finos, pois este fato gera um aumento na coesão e trabalhabilidade do material, porém ocasiona maior consumo de água devido aumento da área superficial e diminuição da durabilidade dos concretos ao desgaste por abrasão (NEVILLE, 1997).

Tabela 4.4: Teor de materiais pulverulentos de outros autores

| <b>Autores</b>      | <b>Teor de materiais pulverulentos (%)</b>        |      |
|---------------------|---|------|
| Sousa (2001)        | 14,23   |      |
| Oliveira (2001)     | 5,43  |      |
| Barbosa Jr. (2008)  | Agregados oriundos de blocos cerâmicos            | 4,77 |
|                     | Agregados oriundos de blocos de concreto          | 4,52 |
|                     | Agregados oriundos de corpos de prova de concreto | 7,89 |
| Gomes et al. (2007) | Agregados oriundos de resíduos de construção      | 7,06 |
|                     | Agregados oriundos de reformas                    | 7,31 |
|                     | Agregados oriundos de depósitos ilegais de rcd    | 7,43 |
| Tenório (2007)      | 8,61  |      |
| Rodrigues (2011)    | 8,7   |      |
| Esta pesquisa       | 12,8%   |      |

O valor da absorção de água do agregado miúdo reciclado foi em torno de 10% maior quando comparado com a absorção da areia natural, mostrando a maior porosidade do RCD. Na Tabela 4.5 encontra-se um resumo da caracterização física dos materiais, e na Tabela 4.6, encontram-se os resultados dos ensaios realizados para o cimento Portland.

Tabela 4.5: Resumo da caracterização física dos materiais constituintes do concreto

|                                       | <b>Areia</b> | <b>Brita</b> | <b>Agregado reciclado</b> |
|---------------------------------------|--------------|--------------|---------------------------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,65         | ---          | 2,50                      |
| Massa unitária (g/m <sup>3</sup> )    | 1,50         | 1,41         | 1,65                      |
| Módulo de finura                      | 2,07         | ---          | 1,90                      |
| Diâmetro máximo                       | 2,40 mm      | 25,00 mm     | 2,40 mm                   |
| Teor de materiais pulverulentos       | ---          | ---          | 12,3%                     |

Tabela 4.6: Normas e ensaios realizados do cimento utilizado

| <b>Ensaio</b>                               | <b>Resultados</b>            |
|---|------------------------------|
| Finura # 75 $\mu\text{m}$ - NBR 3433 (1991) | 2,1%                         |
| Finura Blaine - NBR 7224 (1984)             | 4.955 $\text{cm}^3/\text{g}$ |
| Início de Pega - NBR 3434 (1991)            | 182min                       |
| Fim de Pega - NBR 3434 (1991)               | 254min                       |
| Resistencia 3d - NBR 7215 (1996)            | 21,1MPa                      |
| Resistencia 7d - NBR 7215 (1996)            | 26,3MPa                      |
| Resistencia 28d - NBR 7215 (1996)           | 34,7MPa                      |
| Expansibilidade - NBR 3435 (1991)           | 0,0mm                        |
| Massa específica - NBR 6474 (1984)          | 3,05 $\text{g}/\text{cm}^3$  |

#### 4.1.3. Consumos de materiais por traço

A Tabela 4.7 sintetiza os dados de consumo dos materiais estudados na confecção do concreto desta pesquisa.

Tabela 4.7: Consumos por traço do concreto utilizado

|   | <b>Traço R</b> | <b>Traço 50% RCD</b> | <b>Traço 100% RCD</b> |
|---|----------------|----------------------|-----------------------|
| Traços (1:ad:a:b)                             | 1:1,58:2,99    | 1:1,41:2,65          | 1:1,30:1,30:2,30      |
| Cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )            | 386            | 370                  | 420                   |
| Areia ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )              | 610            | 482                  | ---                   |
| Brita ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )              | 1153           | 852                  | 1115                  |
| Água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )               | 193            | 185                  | 210                   |
| Agregado Reciclado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | ---            | 485                  | 593                   |
| Slump verificado                              | 7,5 cm         | 6,5 cm               | 6,0 cm                |
| A (%)   | 9,00           | 9,87                 | 8,90                  |
| a/c   | 0,50           | 0,50                 | 0,50                  |

Legenda: 1=cimento; ad=adições de RCD; a=areia; b=brita; a/c=relação água/cimento.

Uma quantidade maior de água para a hidratação do cimento também necessitou ser adicionada, devido o excesso de materiais pulverulentos presentes no agregado miúdo reciclado.

## 4.2. ENSAIOS DESTRUTIVOS

### 4.2.1. Ensaio de resistência à compressão simples e por tração diametral

Com o objetivo de fazer uma comparação entre a resistência à tração dos concretos com agregados reciclados e dos concretos de referência, nas Tabelas 4.8 e 4.9 estão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão, e dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, respectivamente.

De acordo com estudos realizados anteriormente (HANSEN e NARUD, 1983 apud LEITE, 2001), quanto menor for a resistência do concreto original, mais comprometidas ficam as características físicas e mecânicas dos agregados reciclados em relação ao agregado natural.

Segundo Leite (2001) foi observado que todos os traços com teores de agregados miúdos reciclados diferentes de 0% apresentaram redução de  $F_c$  quando comparados ao traço de referência; por outro lado, o traço com 100% de agregado miúdo reciclado teve resultados de  $F_c$  maiores que os do concreto de referência (LEITE, 2001).

No presente estudo também podemos observar a mesma tendência que ocorreu no estudo de Leite (2001), sendo o valor de  $f_c$  aos 28 dias, no Traço 100% de RCD, de 28 MPa, maior que o valor de 27 MPa do concreto de referência, enquanto que o menor valor foi de 24 MPa, no Traço 50% de RCD aos 28 dias.

Tabela 4.8: Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples aos 28 dias

|                          | Traço R | Traço 50% RCD | Traço 100% RCD |
|--------------------------|---------|---------------|----------------|
| Média                    | 27,21   | 24,22         | 28,94          |
| Desvio Padrão            | 1,28    | 1,58          | 1,87           |
| Coef. de variação (COV%) | 4,72%   | 6,51%         | 6,45%          |
| Dispersão                | Baixa   | Baixa         | Baixa          |

Segundo Leite (2001), para explicar o aumento da resistência do concreto produzido com 100% de agregado reciclado é necessário avaliar a forma e textura dos grãos e a granulometria. A autora diz que o agregado reciclado possui maior rugosidade, granulometria mais contínua, maior quantidade de finos e maior absorção de água quando comparado ao agregado natural e, que estes fatores reunidos melhoram a resistência do concreto, promovendo uma maior rigidez da matriz.

No presente trabalho, o traço com substituição total de agregado miúdo convencional por agregado miúdo reciclado obteve uma resistência à compressão maior que o concreto de referência, podendo ser devido à maior quantidade de finos do resíduo (preenchimento de vazios) e maior absorção de água que o agregado natural (maior aderência entre a pasta e o agregado reciclado).

Tabela 4.9: Resultados dos ensaios de resistência à compressão por tração diametral aos 28 dias

|                          | <b>Traço R</b> | <b>Traço 50% RCD</b> | <b>Traço 100% RCD</b> |
|--------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|
| Média                    | 2,89           | 3,26                 | 3,44                  |
| Desvio Padrão            | 0,23           | 0,27                 | 0,49                  |
| Coef. de variação (COV%) | 7,89%          | 8,34%                | 14,28%                |
| Dispersão                | Baixa          | Baixa                | Baixa                 |

Para um melhor controle de qualidade do concreto, Wight et al. (2011) determina faixas para o coeficiente de variação de: pobre (acima de 14%), médio (igual a 10,5%) e excelente (menor que 7%). Como os valores, encontrados no presente trabalho para o coeficiente de variação da resistência a compressão, variam de 4,72 a 6,45%, o concreto pode ser enquadrado como excelente. Já para os valores dos coeficientes de variação da compressão por tração diametral, o concreto estaria enquadrado como pobre, com valores entre 7,89 e 14,28%.

#### **4.2.2. Ensaio de Flexão em Viga**

O ensaio de flexão foi realizado nas vigas feitas com concreto convencional e com concreto feito com agregado miúdo 100% reciclado. Trata-se de um ensaio usual de flexão com duas cargas concentradas igualmente espaçadas em relação aos apoios da viga.

O perfil de fissuração na ocasião da ruptura para os dois tipos de concreto estudado acha-se indicado nas Figuras 4.2 e 4.3 a seguir. O exame destas figuras mostra que houve pouca diferença de comportamento, em relação à fissuração, no instante da ruptura, em função da utilização de 100% de agregado reciclado miúdo reciclado. As fissuras na parte tracionada e o esmagamento do concreto na parte comprimida apresentaram perfil similar. Já foi visto anteriormente que do ponto de vista da resistência à compressão, o concreto com agregado miúdo 100% reciclado apresentou um desempenho satisfatório quando comparado com o concreto com agregado miúdo convencional.



Figura 4.2: Ruptura das vigas com concreto convencional



Figura 4.3: Ruptura das vigas com concreto com 100% de RCD

No estudo de Aragão (2007), realizado com vigas produzidas com concreto convencional, com concreto com 50% de RCD e concreto com 100% de RCD, o momento de fissuração da viga com concreto com 50% aumentou em relação à viga de referência, e a viga produzida com concreto com 100% de RCD apresentou um momento de fissuração menor que a viga de referência e do que a viga com 50% de RCD, mesma tendência observada no presente estudo.

A Figura 4.4 mostra a curva Força x Deslocamento das vigas ensaiadas. O exame desta figura permite concluir que para um mesmo nível de carga a viga confeccionada com 100% de agregado reciclado miúdo exibiu uma flecha sempre superior à viga confeccionada com concreto convencional, mostrando uma menor rigidez da viga com concreto de resíduo de construção.

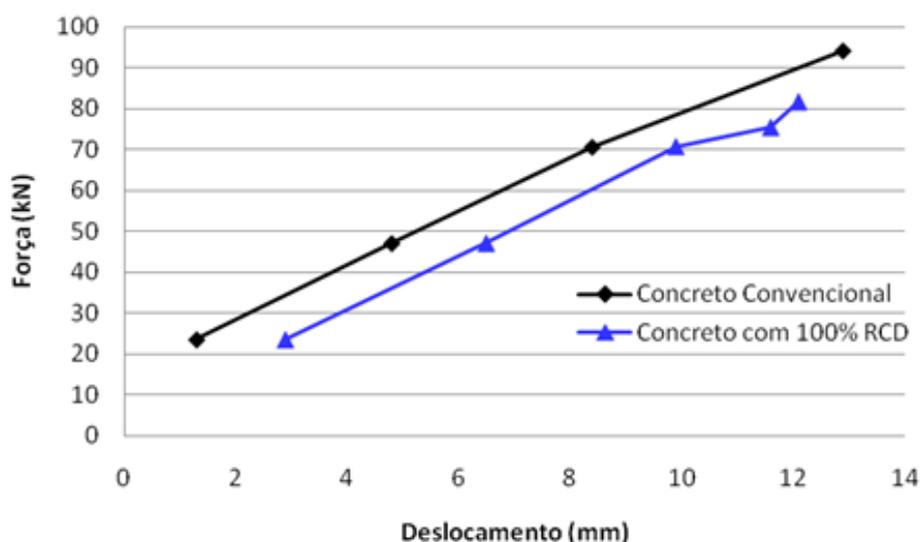


Figura 4.4: Curva Força x Deslocamentos das Vigas Ensaçadas

Foi possível observar também uma ligeira mudança na inclinação das duas curvas para um mesmo nível de carga (cerca de 70 kN) que representa o início do processo de fissuração da viga, sendo esta mudança mais acentuada para a viga confeccionada com 100% de agregado reciclado, caracterizando uma perda de rigidez em função do início do processo de fissuração e, por fim, se observa um maior aumento nos deslocamentos sem incremento de cargas. Também se pode observar a mesma tendência no estudo de Aragão (2007), em que a viga de concreto com 100% de RCD apresentou flecha sempre maior que a viga de concreto convencional.

### 4.3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Neste trabalho foram estudadas as correlações entre os ensaios destrutivos e não destrutivos, ou seja, as correlações entre  $f_c$  (resistência à compressão) e  $V$  (velocidade de ondas ultrassônicas), I.E (índice esclerométrico), e que tipo de equação melhor representam estas correlações, com o objetivo de avaliar a viabilidade de utilização da combinação de métodos de ensaios destrutivos e não destrutivos.

#### 4.3.1. Ensaio de velocidade de ondas ultrassônicas

Foram realizados ensaios de ultrassom para determinar a velocidade de propagação da onda nos concretos analisados. A Tabela 4.10 apresenta os

resultados de ultrassom realizados nos corpos de prova confeccionados. É possível observar examinando a Tabela 4.10 que a velocidade da onda ultrassônica média atingiu o menor valor – 4.168 m/s – para o concreto com 100% de agregado reciclado e o maior valor – 4.557 m/s – para o concreto de referência. O concreto confeccionado com 50% de substituição do agregado miúdo convencional por areia reciclada de RCD apresentou resultado muito próximo ao concreto de referência.

Tabela 4.10: Resumo dos resultados de velocidade de ondas ultrassônicas aos 28 dias

|                                      | Traço R                              |                             | Traço 50% RCD                        |                             | Traço 100% RCD                       |                             |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
|                                      | <b>Tempo<br/>(<math>\mu</math>s)</b> | <b>Velocidade<br/>(m/s)</b> | <b>Tempo<br/>(<math>\mu</math>s)</b> | <b>Velocidade<br/>(m/s)</b> | <b>Tempo<br/>(<math>\mu</math>s)</b> | <b>Velocidade<br/>(m/s)</b> |
| Média                                | 44,00                                | 4557,28                     | 44,50                                | 4539,90                     | 48,00                                | 4168,48                     |
| Desvio<br>Padrão                     | 0,71                                 | 57,17                       | 0,71                                 | 72,14                       | 1,41                                 | 122,81                      |
| Coeficiente<br>de variação<br>(COV%) | 1,61%                                | 1,25%                       | 1,59%                                | 1,59%                       | 2,95%                                | 2,95%                       |
| Dispersão                            | Baixa                                | Baixa                       | Baixa                                | Baixa                       | Baixa                                | Baixa                       |

Foram realizadas também correlações entre  $f_c$  e  $V$  e as equações se encontram na Tabela 4.11. Os gráficos foram elaborados com as equações lineares propostas na Tabela 4.11 e na Figura 4.5 podem ser vistos os gráficos elaborados.

Tabela 4.11: Equações de correlação entre  $f_c$  e  $V$  (Km/s)

|                | <b>Equação</b>         | <b>R<sup>2</sup></b> |
|----------------|------------------------|----------------------|
| Traço R        | $f_c = 4,42V - 8,10$   | 0,81                 |
| Traço 50% RCD  | $f_c = 18,39V - 58,29$ | 0,90                 |
| Traço 100% RCD | $f_c = 11,73V - 19,98$ | 0,89                 |

Legenda: C=consumo de cimento; a/c=água/cimento;  $F_c$ =resistência do concreto.

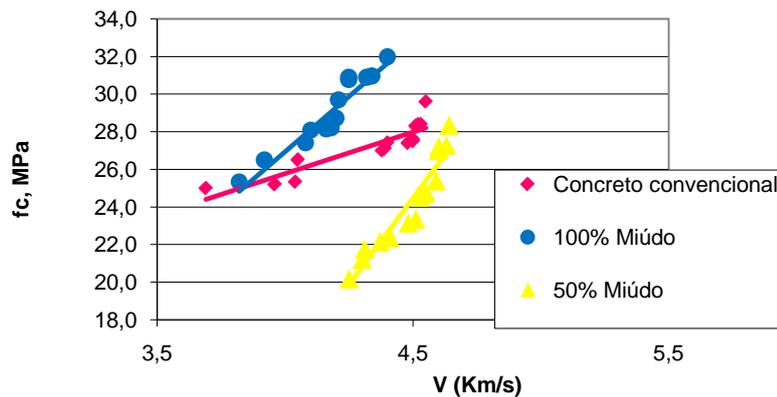


Figura 4.5: Correlação entre velocidade de ondas ultrassônicas e resistência à compressão do concreto para os Traços R, 50% e 100%

Pode-se concluir, portanto, que do ponto de vista da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas os concretos estudados são equivalentes a um concreto convencional, com velocidades entre 4.000 e 4.500 m/s (EVANGELISTA, 2002). Os coeficientes de correlação também apresentam resultados dentro da média.

#### 4.3.2. Esclerometria

Foram realizados ensaios de esclerometria, para avaliar a resistência superficial dos corpos de prova do concreto convencional e dos concretos com agregados reciclados de resíduo de construção e demolição.

Na Tabela 4.12 encontram-se os resultados obtidos no ensaio de esclerometria aos 28 dias. O maior valor de IE obtido foi de 29, aos 28 dias, nos Traços R e 100%, enquanto que o menor foi de 27, no Traço 50%. Os valores apresentados correspondem às médias de 9 determinações obtidas na superfície do concreto.

Tabela 4.12: Resumo dos resultados de índice esclerométrico do Traço R aos 28 dias

|                                | Traço R | Traço 50% RCD | Traço 100% RCD |
|--------------------------------|---------|---------------|----------------|
| Média                          | 29,73   | 27,41         | 29,67          |
| Desvio Padrão                  | 0,97    | 2,20          | 1,12           |
| Coeficiente de variação (COV%) | 3,28%   | 8,03%         | 3,78%          |
| Dispersão                      | Baixa   | Baixa         | Baixa          |

Os resultados obtidos quando comparados com outros autores, se situaram dentro da faixa delimitada como válida (EVANGELISTA, 2002). Para as correlações entre  $f_c$  e IE, os gráficos foram elaborados com equações lineares propostas na Tabela 4.13. Na Figura 4.9 podem ser vistos os gráficos elaborados.

Tabela 4.13: Equações de correlação entre  $f_c$  e IE

|                | Equação                 | $R^2$ |
|----------------|-------------------------|-------|
| Traço R        | $f_c = 15,54IE - 18,49$ | 0,77  |
| Traço 50% RCD  | $f_c = 1,30IE - 11,82$  | 0,86  |
| Traço 100% RCD | $f_c = 1,62IE - 19,16$  | 0,92  |

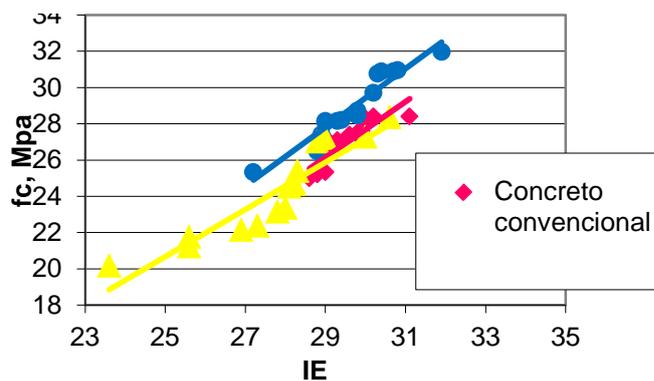


Figura 4.11: Correlação entre índice esclerométrico e resistência à compressão do concreto para os Traços R, 50% e 100%

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS COM ADIÇÕES

##### 4.4.1 Ensaio de limites de liquidez e plasticidade

Após os ensaios realizados e descritos no Capítulo 3, foi encontrado, para a composição de 75% de solo e 25% de resíduo (mistura 3), o limite de liquidez de 28% e um limite de plasticidade de 16%. Já na composição de 25% de solo e 75% de RCD (mistura 1) e na composição de 50% de solo e 50% de RCD (mistura 2) os resultados foram não-plástico e não-líquido, assim como os resultados do RCD. No solo natural de referência, o limite de liquidez foi de 33% e o limite de plasticidade de 6% (Tabela 4.14).

Tabela 4.14: Limites de Atterberg

|                    | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|--------------------|--------|--------|--------|
| Solo natural       | 33     | 6      | 27     |
| RCD                | NL     | LP     | NP     |
| 25% SOLO + 75% RCD | NL     | LP     | NP     |
| 50% SOLO + 50% RCD | NL     | LP     | NP     |
| 75% SOLO + 25% RCD | 28     | 16     | 12     |

RCD: resíduo de construção e demolição  
 Mistura 1: 25% de solo+75% de RCD  
 Mistura 2: 50% de solo+50% de RCD  
 Mistura 3: 75% de solo+25% de RCD

LL: limite de liquidez  
 LP: limite de plasticidade  
 IP: índice de plasticidade  
 NL: não líquido  
 NP: não plástico

Segundo SANTOS (2007), em seus ensaios de limites de consistência, todas as amostras ensaiadas apresentaram comportamento não-plástico, sendo considerado um ponto positivo para os RCD ensaiados segundo a norma BS 8006 e FHWA 2001, que sugerem materiais sem parcela de resistência coesiva.

##### 4.4.2 Ensaio de granulometria

A análise granulométrica do RCD foi realizada por peneiramento manual e a seco, de acordo com a NBR 7181:1984, e a curva de distribuição granulométrica do resíduo, está representada na Figura 4.7. Também foram realizados ensaios de granulometria para o solo natural de referência (Figura 4.8) e para as misturas 1, 2 e 3, de solo natural com RCD.

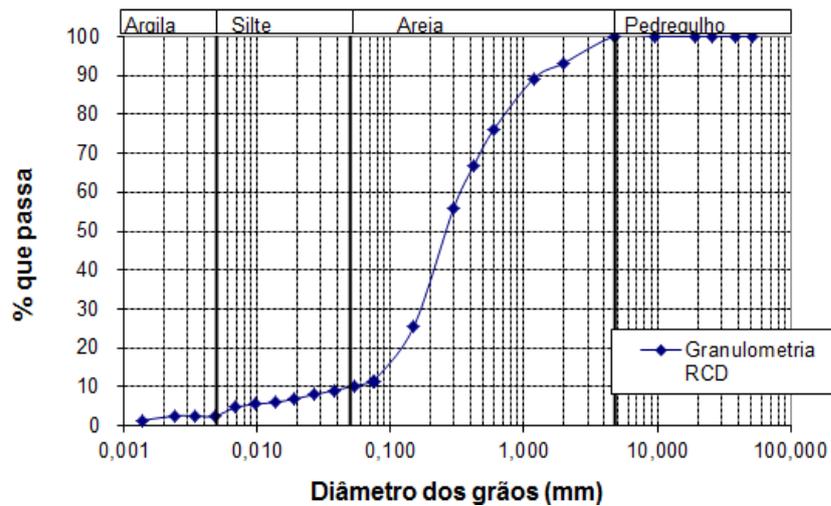


Figura 4.7: Curva granulométrica do RCD

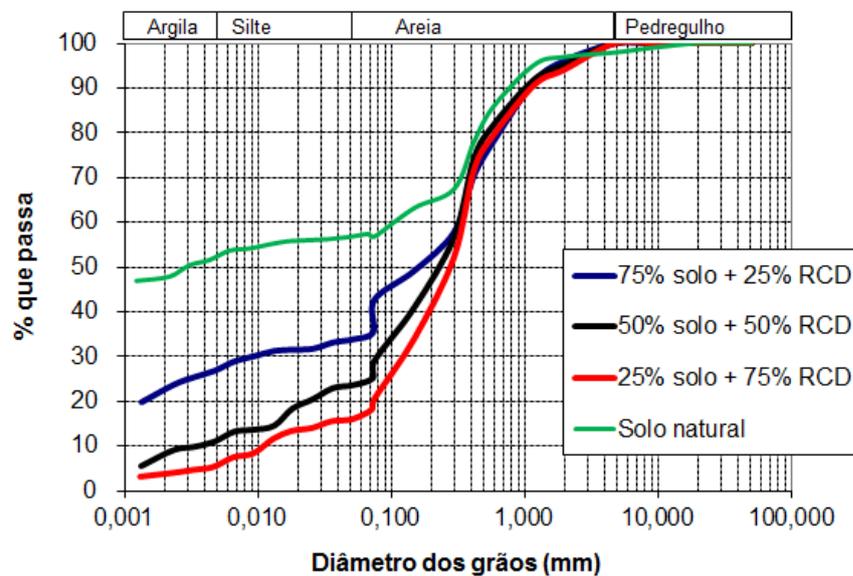


Figura 4.8: Comparação das curvas granulométricas – misturas e solo natural

O RCD compõe-se por cerca de 3% de argila, 7% de silte e 90% de areia, e o solo natural é composto por 51% de argila, 5% de silte, 41% de areia e 4% de pedregulho. A composição das misturas encontra-se representada na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Composição das amostras

|                    | Argila | Silte | Areia | Pedregulho |
|--------------------|--------|-------|-------|------------|
| Solo natural       | 51%    | 5%    | 41%   | 4%         |
| RCD                | 3%     | 7%    | 90%   | 0          |
| 25% SOLO + 75% RCD | 5%     | 10%   | 85%   | 0          |
| 50% SOLO + 50% RCD | 10%    | 13%   | 77%   | 0          |
| 75% SOLO + 25% RCD | 26%    | 7%    | 67%   | 0          |

Através dos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, pode-se classificar o solo, o RCD e as misturas de acordo com a classificação unificada (ASTM D 2487:1985) e a classificação TRB. Também através da análise granulométrica, têm-se dados para avaliar se o material em questão atende aos quesitos da NBR 15116:2004, e avaliar alguns critérios como a porcentagem do material passante na peneira nº 40, dimensão característica máxima dos grãos e o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ). As classificações dos materiais encontram-se na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Classificação do solo natural, RCD e misturas

|                    | <b>Classificação unificada</b> | <b>TRB</b> |
|--------------------|--------------------------------|------------|
| Solo natural       | CL                             | A – 6      |
| RCD                | SM                             | A – 3      |
| 25% SOLO + 75% RCD | SM                             | A – 3      |
| 50% SOLO + 50% RCD | SM                             | A – 3      |
| 75% SOLO + 25% RCD | SC                             | A – 6      |

Segundo a classificação unificada, a mistura 3 pode ser classificada como sendo uma areia argilosa, mistura de areia e argila, de acordo com a sigla SC. Já na classificação TRB, pode ser classificada como um solo argiloso, regular a mau (A-6). O solo natural, segundo a classificação unificada, pode ser classificado como argila inorgânica de baixa e média plasticidade (sigla CL) e na classificação TBR, pode ser classificado como um solo argiloso de regular a mau (A-6).

A Tabela 4.17 mostra os limites estabelecidos pela norma e os resultados dos ensaios de granulometria obtidos para o RCD.

Tabela 4.17: Parâmetros estabelecidos pela NBR 15116:2004

|   | <b>Limites NBR 15116:2004</b> | <b>Limites RCD</b> |
|---|-------------------------------|--------------------|
| Dimensão característica máxima dos grãos          | 63,5 mm                       | 2,40 mm            |
| Porcentagem do material passante na peneira nº 40 | 10 a 40 %                     | 66,75%             |
| Coeficiente de uniformidade ( $C_u$ )             | $\geq 10$                     | 7                  |

Comparando os parâmetros estabelecidos pela NBR 15116:2004 com os valores encontrados no presente estudo, percebe-se que o RCD apresenta resultados diferentes dos limites estabelecidos pela referida norma, porém segundo a classificação unificada, com o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) no valor de 7, pode-se classificar como sendo uma areia bem graduada.

Com relação à fração passante nas peneiras, o resíduo de construção apresenta fração passante na peneira 40 de 66,75%, acima do limite da NBR 15116:2004, que estabelece faixa de 10 a 40%.

#### 4.4.3 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados com energia de Proctor normal, para o resíduo de construção e demolição, para o solo natural e para as misturas 1, 2 e 3. Na Figura 4.9 estão representadas as curvas de compactação do solo natural, do resíduo e das misturas 1, 2 e 3.

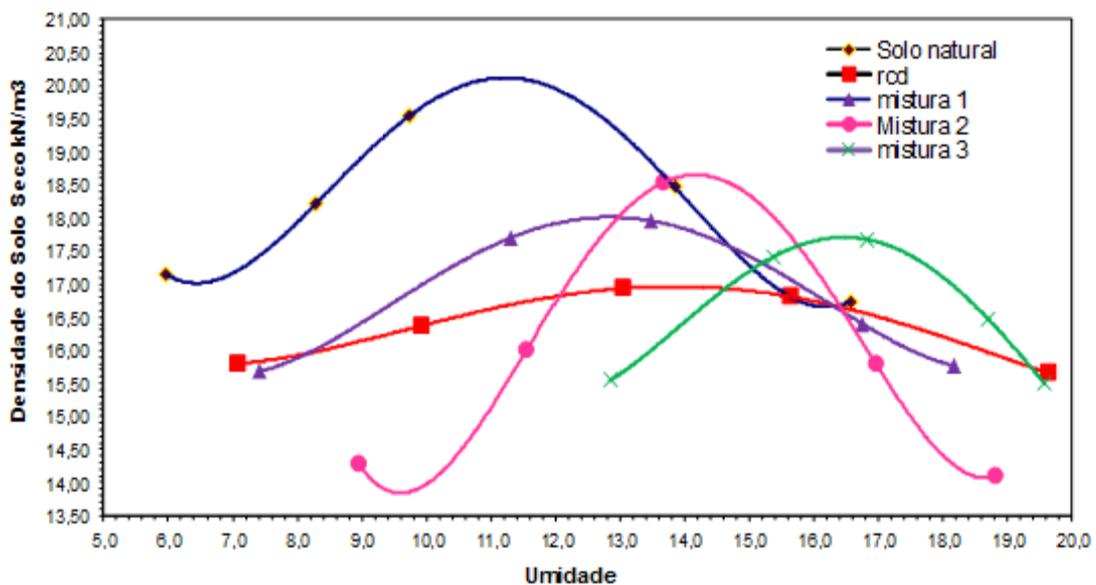


Figura 4.9: Curvas de compactação

O formato se assemelha às curvas de compactação mais usuais e, segundo LEITE (2007), é um diferencial deste material, pois a umidade ótima para as curvas de compactação de resíduos não são facilmente determinadas nos ensaios de compactação.

O resultado do ensaio de compactação fornece um valor de umidade ótima de 14% e o valor de densidade máxima igual a 17,0 kN/m<sup>3</sup> para o RCD. Pode-se observar nos resultados da Tabela 4.18 que os valores de umidade ótima aumentam à medida que a porcentagem de resíduos das misturas com solo também aumenta.

Tabela 4.18: Resumo dos resultados dos ensaios de compactação

| <b>Amostra</b>     | <b>w<sub>ot</sub> (%)</b> | <b>pd<sub>máx</sub> (kN/m<sup>3</sup>)</b> |
|--------------------|---------------------------|--|
| RCD                | 14                        | 17,0                                       |
| Solo natural       | 11,1                      | 20,1                                       |
| 25% SOLO + 75% RCD | 16,6                      | 17,7                                       |
| 50% SOLO + 50% RCD | 14,2                      | 18,5                                       |
| 75% SOLO + 25% RCD | 13                        | 18,0                                       |

Wot: umidade ótima,  
pdmáx: densidade máxima

Na Tabela 4.19 estão os resultados de ensaios de compactação do RCD de outros autores comparando-os com os do presente estudo.

Tabela 4.19: Resultados dos ensaios de compactação de RCD de outros autores

| <b>Autores</b>        | <b>w<sub>ot</sub> (%)</b> | <b>pd<sub>máx</sub> (kN/m<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------------|---------------------------|--|
| Bennert et al. (2000) | 7,5                       | 19,8                                       |
| Macedo (2010)         | 15,5                      | 17,1                                       |
| Esta pesquisa         | 14                        | 17,0                                       |

Wot: umidade ótima  
pdmáx: densidade máxima

Curvas de granulometria feitas antes e depois do ensaio de compactação do RCD demonstram que não houve alteração significativa do material (Figura 4.10).

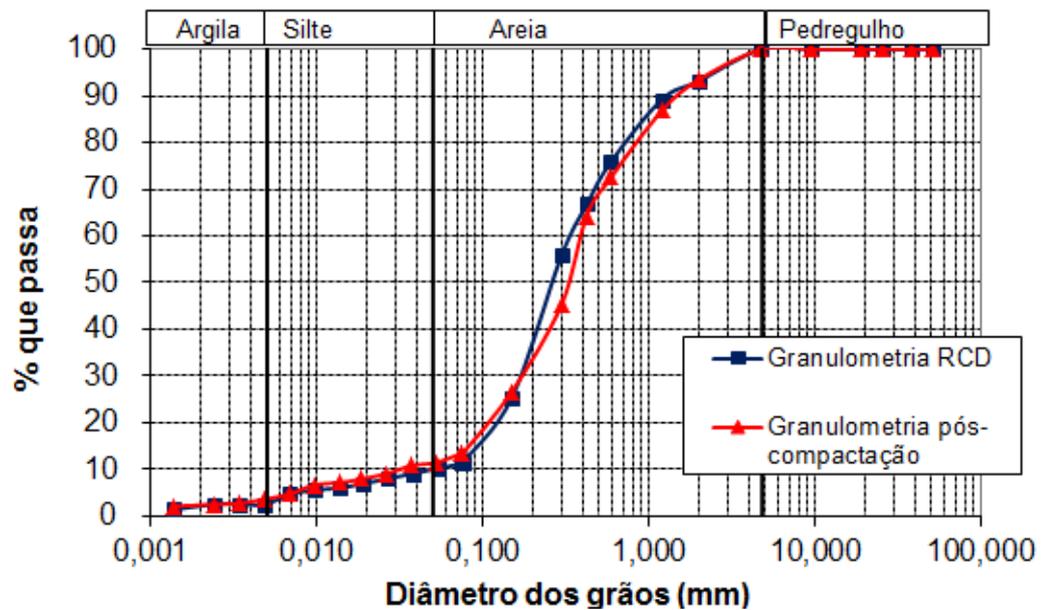


Figura 4.10: Comparação das curvas granulométricas do RCD antes e depois da compactação

#### 4.4.4 Ensaio de CBR

O resultado do ensaio de CBR do RCD revela que a amostra não é expansiva e que, para a umidade ótima, apresenta um valor de CBR igual a 19,8%. A tabela 4.20 apresenta um resumo dos resultados de CBR das amostras ensaiadas.

Tabela 4.20: Resumo dos resultados dos ensaios de CBR

| Amostra            | CBR (%) |
|--------------------|---------|
| RCD                | 19,8    |
| Solo natural       | 68,4    |
| 25% SOLO + 75% RCD | 8,40    |
| 50% SOLO + 50% RCD | 17,4    |
| 75% SOLO + 25% RCD | 43,2    |

De acordo com os requisitos da ABNT NBR 15116: 2004, a mistura 1 pode ser utilizada para execução de revestimento primário e sub-base, já as misturas 2 e 3, com maior porcentagem de RCD, podem ser utilizadas para reforço de subleito de rodovias. O RCD, com um valor de CBR igual a 19,8%, pode ser utilizado para execução de reforço de subleito. A Tabela 4.21 apresenta um resumo das aplicações dos RCD de acordo com os valores de CBR com energia de Proctor normal.

Tabela 4.21: Requisitos específicos para agregado reciclado destinado à pavimentação  
 Fonte: ABNT NBR 15116: 2004

| Aplicação  | CBR | Expansibilidade | Energia de Compactação      |
|--|-----|-----------------|-----------------------------|
| Material para execução de reforço de subleito              | ≥12 | ≤1,0            | Normal                      |
| Material para execução de revestimento primário e sub-base | ≥20 | ≤1,0            | Intermediária               |
| Material para execução de base de pavimento                | ≥60 | ≤0,5            | Intermediária ou modificada |

Ainda de acordo com os requisitos da ABNT NBR 15116: 2004, os materiais que não atendem aos requisitos da norma podem passar por uma estabilização granulométrica ou ter adições de cimento Portland ou cal hidratada para se adequar as prescrições da referida norma.

#### 4.4.5 Ensaio de compressão edométrica

O ensaio de compressão edométrica foi realizado utilizando duas amostras cilíndricas, uma inundada e outra seca, do RCD e das misturas de solo com resíduo, com o objetivo de verificar os parâmetros de compressibilidade do resíduo em questão.

Com base na avaliação dos resultados dos ensaios, observam-se poucas deformações do material, e os índices de compressão revelam materiais de baixa compressibilidade. Os índices de compressão  $C_c$  estão compreendidos na faixa de 0,018 a 0,040 (Tabelas 4.22 e 4.23). De acordo com Feitosa (2009), os valores se aproximam dos valores de areia natural, que possui índices de compressão variando de 0,015 a 0,021.

Tabela 4.22: Resumo dos resultados dos ensaios de compressibilidade amostras secas

|    | 25% SOLO + 75% RCD | 50% SOLO + 50% RCD | 75% SOLO + 25% RCD |
|----|--------------------|--------------------|--------------------|
| Cc | 0,040              | 0,020              | 0,018              |
| Cs | 0,007              | 0,015              | 0,003              |
| eo | 0,377              | 0,394              | 0,244              |

Cc: índice de compressão  
 Cs: índice de expansão  
 eo: índice de vazios

Tabela 4.26: Resumo dos resultados dos ensaios de compressibilidade amostras inundadas

|    | 25% SOLO + 75% RCD | 50% SOLO + 50% RCD | 75% SOLO + 25% RCD |
|----|--------------------|--------------------|--------------------|
| Cc | 0,025              | 0,022              | 0,056              |
| Cs | 0,007              | 0,007              | 0,007              |
| eo | 0,346              | 0,271              | 0,227              |

Cc: índice de compressão  
Cs: índice de expansão  
eo: índice de vazios

As curvas das amostras secas e inundadas possuem uma tendência de seguir uma faixa bem definida, após a tensão de cedência. Na Figura 4.11 estão representadas todas as curvas das amostras secas para comparação, e na Figura 4.12, estão representadas todas as curvas das amostras inundadas.

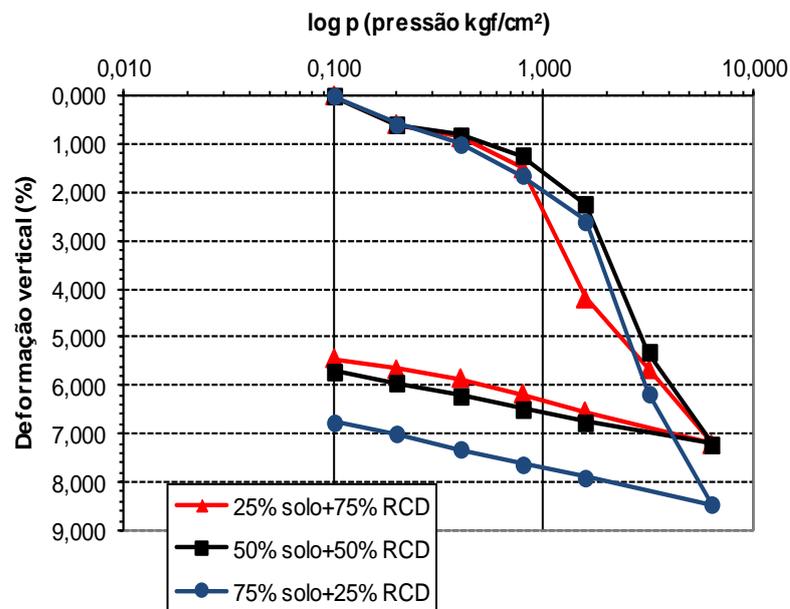


Figura 4.11: Gráfico de deformação vertical versus log pressão – Misturas amostra inundada

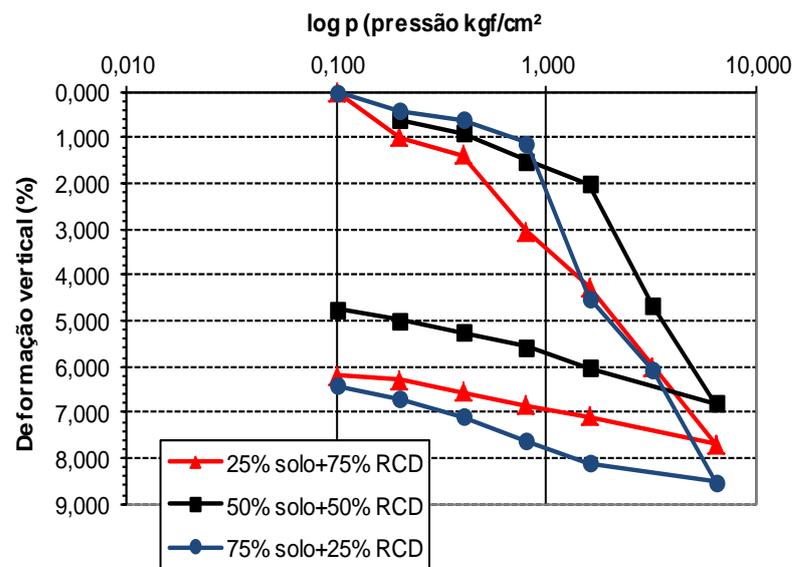


Figura 4.12: Gráfico de deformação vertical versus log pressão – Misturas amostra seca

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

### 5.1. CONCLUSÕES

As conclusões referentes ao concreto convencional e aos concretos com agregado miúdo reciclado (RCD) foram:

- A composição gravimétrica do resíduo mostrou que este possui material cerâmico em maior quantidade em sua composição, sendo este 46% do total de materiais.
- Com relação à composição granulométrica, o resíduo apresentou valores de módulo de finura e diâmetro máximo inferiores aos valores do agregado natural estudado.
- O teor de materiais pulverulentos encontrado, igual a 12,3 % está acima do permitido na ABNT NBR NM 46 (2003), porém sem alterar significativamente as propriedades mecânicas dos concretos produzidos e dentro do limite estabelecido pela ABNT NBR 15116:2004 para o teor de materiais finos, que varia de 10 a 15%.
- Foi observado que o concreto com substituição de 100% de agregado natural por agregado miúdo reciclado possui características semelhantes ao concreto de referência, atingindo uma resistência à compressão de  $f_c=28$  Mpa, sendo até superior que a resistência do concreto de referência, de  $f_c=27$  Mpa, porém com um consumo de cimento e de água superior ao concreto de referência.
- Com relação à velocidade das ondas ultrassônicas, o concreto de referência e os concretos com agregados miúdos reciclados exibiram velocidades de propagação de ondas ultrassônicas muito próximas, variando entre 4.168 m/s e 4.557 m/s.
- Quanto aos índices esclerométricos não foram observadas importantes diferenças entre os concretos com agregado miúdo convencional e os concretos com utilização de agregados miúdos reciclados nas proporções de 50% e 100% de RCD.
- O perfil de ruptura das vigas, confeccionadas com agregados miúdos convencionais e agregados reciclados miúdos de RCD, não apresentaram diferenças significativas.

- Para um mesmo nível de carga a viga confeccionada com 100% de agregado miúdo de RCD apresentou deslocamentos verticais (flechas no meio da vão) maiores do que a viga confeccionada com 100% de agregado convencional, aspecto que caracteriza uma menor rigidez da viga feita com agregado reciclado.

As conclusões referentes ao uso do RCD com misturas de solo são as seguintes:

- O RCD compõe-se de 3% de argila, 7% de silte e 90% de areia, podendo ser classificado como uma areia siltosa (SM) pela classificação unificada e como uma areia fina, de excelente a bom, pela classificação TRB. As misturas 1 e 2 não tiveram diferenças significativas, também podendo ser classificadas como areia siltosa (SM). A mistura 3 pode ser classificada como sendo uma areia argilosa (SC) e na classificação TRB, pode ser classificada como um solo argiloso, regular a mau (A-6). O solo natural, segundo a classificação unificada, pode ser classificado como argila inorgânica de baixa e média plasticidade (CL) e na classificação TBR, pode ser classificado como um solo argiloso de regular a mau (A-6).
- Nos ensaios de limites de consistência, os resultados do RCD foram não líquido e não-plástico, sendo considerado um ponto positivo para o RCD segundo as normas BS 8006 e FHWA (2001), que sugerem materiais sem parcela de resistência coesiva. Desta maneira o RCD pode ser usado para reduzir a plasticidade de um solo natural.
- A granulometria do resíduo não sofre alterações significativas após a compactação.
- O resultado do ensaio de CBR do RCD, de 19,8% e de que a amostra não é expansiva, possibilita o seu uso para execução de revestimento primário e sub-base, de acordo com os requisitos da ABNT NBR 15116:2004.
- Os índices de compressibilidade mostram que o resíduo é um material de baixa compressibilidade, com índices variando de 0,018 a 0,040, que se assemelham aos índices da areia natural, que estão na faixa de 0,015 até 0,021.

## 5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS:

- Realizar estudos de durabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados.
- Analisar outros métodos de dosagem de concreto que possam se adequar ao uso com agregados reciclados.
- Analisar a viabilidade econômica de utilização do concreto em obras em Recife/PE, bem como o valor do produto e a comparação deste com o valor dos agregados naturais.

## REFERÊNCIAS

ALHEIROS, M.M.; MENEZES, M.F.; FERREIRA, M.G., **Carta Geotécnica da Cidade do Recife, Sub-Área Geologia/Geologia de Engenharia, Relatório Final de Atividades**. FINEP/UFPE, 1990, 81 p.

ALHEIROS, M. M., **Riscos de escorregamento na Região Metropolitana do Recife**. Tese de Doutorado 1990, 135p.

ANGULO, Sérgio Cirelli et al. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, v. 5, p. 293-307, 2002.

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos**. 2005. 167p. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2005.

ARAGÃO, H. G. **Análise estrutural de lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, 2007, 109p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro. 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**. Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro. 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**. Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro. 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte califórnia - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007**: Solo - Ensaio de adesamento unidimensional - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**, 1982, “Agregado em Estado Solto - Determinação da Massa Unitária”, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 30**. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 46**. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 58**, 1996, “Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica”.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NM 67**. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 78**, 1996, “Concreto endurecido – avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão”.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO DRYWALL. **Resíduos de Gesso na Construção Civil: coleta, armazenagem e reciclagem**. São Paulo/SP, Agns Gráfica e Editora, 2012.

ASTM, D. 2487-00 **Standard classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)**. Annual Book of ASTM Standards, Section, v.4.

BARBOSA JR. Álvaro Sergio. **Estudo da utilização de agregado reciclado em misturas de concreto de cimento Portland para pavimentação.** Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas: UNICAMP. 2008. 118p.

BENNERT, T.; PAPP JR., W. J.; MAHER, A.; GUCUSNSKI, N. **Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications.** Transportation Research Record, n. 1714, p.33-39, 2000.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução nº 307**, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios, procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília-DF.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução nº 348**, de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Brasília-DF.

BRITO FILHO, Jerson A. **Cidades versus entulho.** In: **Seminário Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem na construção civil**, 2., 1999, São Paulo. Anais... São Paulo: Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 – Meio Ambiente, 1999. p.56-67.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e Ações da Atual Situação dos Resíduos de Construção e Demolição na Cidade do Recife.** 2005. 120p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa/PB, 2005.

DIAS, João Fernando. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para o seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo.** Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo: USP, 2004. 251p.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos.** Tese de Doutorado, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2002, 209p.

FEITOSA, Maria Célia Alves. **Lodo de esgoto: algumas aplicações em engenharia.** Recife: UNICAP, 2009. 120p. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação.** Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ). Rio de Janeiro: 2004. 109p.

FREITAS, Rosana Leal Simões de; CAVALCANTE, Milena Andrade. **Logística no canteiro de obra.** Salvador: UFBA, 2009.

FONSECA, Ewerton Clayton Alves da. **Análise numérica do comportamento de muros reforçados com geossintéticos construídos com material de aterro não convencional.** Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília: UNB, 2012. 93p.

GOMES, T. L. **Avaliação quali-quantitativa de percolado gerado no aterro controlado de Santa Maria,RS.**2005.96 f. Dissertação mestrado em engenharia civil – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2005.

GRUBBA, David Christian Regis Pereira. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2009, 139p.

GUSMÃO, A D. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil.** Recife: Gráfica Editora, 2008. 140 p.

HANSEN T. C. RILEM, **Report 6 Recycling of Demolished Concrete and masonry**, London, E&FN SPON an imprint of Chapman & Hall, 1992, 305p.

JOHN, V. M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem.** Artigo. São Paulo: PCC-EPUSP. 2005. Disponível em <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>>. Acesso em: 20 de outubro de 2012.

JOHN, V. M. **Aproveitamento de resíduos sólidos como material de construção.** In: CASSA, J. C.; CARNEIRO, A. P. BRUM, I. A. S. (Organ.). Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção: projeto entulho bom. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2002. p.28-45.

JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar.** Artigo. São Paulo: PCC-EPUSP. 2004. Disponível em <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>>. Acesso em: 5 de abril de 2013.

JOHN,V.M.; AGOPYAN,N. **Reciclagem de resíduos da construção.** Artigo. São Paulo: PCC-EPUSP. 2000. Disponível em <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>>. Acesso em: 15 de julho de 2012.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** Tese (livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: 2000. 102 p.

LAURITZEN, K. Erik, Recycling concrete—an overview of development and challenges. DEMEX Consulting Engineers A/S, Denmark. Fourth International RILEM Conference on the Use of recycled Materials in Buildings and Structures, November 9th–11th. Barcelona; 2004.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição,** 2001. 270p. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre/RS, 2001.

LEITE, Fabiana da Conceição. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos.** Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2007

LIMA, J.A.R. **Proposição de diretrizes para a produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** São Carlos, 1999. 204p. Dissertação (Mestrado). EESC, Universidade de São Paulo.

LIMA, Analice França. **Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta da formação barreiras na área urbana da Cidade do Recife.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife: UFPE, 2002. 186p.

LIRA JR., E. A. de. **Uso de resíduos de construção e demolição (RCD) em estacas de compactação para melhoramento de solos.** Recife. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife: UPE, 2010. 166p.

MACEDO, Thaísa Ferreira. **Análise do desempenho mecânico da mistura agregado reciclado-solo-fibra-cimento para pavimentação.** Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife: UPE, 2010. 166p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 1ª Ed, São Paulo: IBRACON. 2008. 674p.

MIRANDA, Leonardo F. R. et Al, **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008,** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar., 2009.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** 2005. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2005.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto.** 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

NOLASCO, A. M.; AGNESINI, MVC. **Utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil. Avanços em tecnologia e gestão da produção de edificações.** Florianópolis. São Paulo: ANTAC, v. 1, p. 55-64, 1993.

OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C. S. **Resíduos da construção: desenvolvimento sustentável.** In: 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. João Pessoa, 2001. 1 CD-ROM.

PABLOS, J. M. **Utilização do Resíduo Sólido Gerado pelo Descarte das Areias de Fundação Aglomeradas com Argila no Setor da Construção Civil**. 1995. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, EESC-USP.

PAULA, P. R. F. **Utilização dos resíduos da construção civil na produção de blocos de argamassa sem função estrutural**. 2010. 131p. Dissertação de mestrado, Universidade Católica de Pernambuco, Recife/PE, 2010.

PINTO, TARCÍSIO DE PAULA. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189p. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 1999.

PIOVEZAN JÚNIOR, Gilson Tadeu Amaral. **Avaliação dos resíduos da construção civil (rcc) gerados no município de Santa Maria**. 2007. 76p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria/RS, 2007.

PROENÇA, Felipe Torres Tavares Cerveira. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduos da construção civil para o aproveitamento em obras de pavimentação**. 2012. 120p. Dissertação de mestrado, Universidade de Pernambuco, Recife/PE, 2012.

ROCHA, Janaíde Cavalcante. John, Vanderley M. et al. **Utilização de Resíduos da Construção Habitacional**. Coleção Habitare ANTAC, Volume 4, capítulo 3, Ano: 2003. Disponível em: [http://www.habitare.org.br/publicacao\\_coletanea4.aspx](http://www.habitare.org.br/publicacao_coletanea4.aspx). Acesso 01 de junho de 2010.

RODRIGUES, Clarissa Ribeiro de Sá. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife: UPE, 2011. 118p.

SANTOS, Almai do Nascimento dos, **Diagnóstico da Situação dos Resíduos de construção e Demolição (RCD) no Município de Petrolina (PE)**. 2008. 111p. Dissertação de Mestrado, Universidade Católica de Pernambuco, Recife/PE, 2008.

SANTOS, Eder Carlos Guedes dos, **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. Dissertação de mestrado, USP, São Carlos/SP, 2007, 168p.

SANTOS, Eder Carlos Guedes dos, PALMEIRA, Ennio Marques, **Estruturas de Solo reforçado e Resíduos de Construção e Demolição Reciclados**, Revista Fundações e Obras Geotécnicas, Ano 1, Número 6. Disponível em: <http://www.editorarudder.com.br/catalogo>. Acesso 01 de setembro de 2012.

SANTOS, E. C. G. **Avaliação Experimental de Muros Reforçados Executados com Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e Solo Fino**. 2011. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília. Brasília, DF, Brasil.

SANTOS, P. Souza. **Tecnologia de Argilas Aplicada às Argilas Brasileiras**, Edgard Blücher, São Paulo, 1975.

SILVA, João; DE BRITO, Jorge; VEIGA, M<sup>a</sup> Rosário. **Argamassas com incorporação de agregados cerâmicos. Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 11, p. 13-21, 2008.

SILVA, Thalita Cristina Rodrigues; FUCALE, Stela Paulino; GUSMÃO, Alexandre Duarte; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. **Caracterização e Resistência em Resíduos da Construção Civil**. In: Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica. Búzios: ABMS. 2008

SOUSA, José Getúlio Gomes. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto: Aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado**. Dissertação (mestrado). Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Distrito Federal, 2001, 120p.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. F. **Recycling of masonry rubble**. In: **HANSEN, T. C. Recycling of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. Part Two, p.161-255. (RILEM TC Report 6).

ULSEN, Carina. **Caracterização tecnológica de resíduos da construção e demolição**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de minas e petróleo. São Paulo, 2006. 171p.

WIGHT, J. K. and MacGregor, J. G. **Reinforced Concrete: Mechanics and Design, 6<sup>th</sup> Edition**, Pearson Higher Ed USA, 1176p, 2011.

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

ZORDAN; S.E. **Entulho da indústria da construção civil**. Artigo. São Paulo: PCC-EPUSP, 2006. Disponível em <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2012.

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1**

## Anexo 1 - Beneficiamento do RCD

Os trabalhos de beneficiamento são conduzidos sob a supervisão da Prefeitura Municipal de Petrolina/PE e os resíduos são provenientes de RCD recolhido nas obras locais. A composição deste material contém resíduos de escavações, resíduos de demolições de concreto simples e armado, resíduos de alvenaria cerâmica e de blocos de concreto, de revestimentos de argamassa e cerâmica.

No processo de preparo, o RCD recolhido por caminhões nas obras, é estocado em pilhas, no pátio da usina, recebe uma separação manual inicial de materiais como madeira, plástico e gesso.

Na sequência, é carregado para a usina por uma pá mecânica com pneus, até uma caçamba vibratória do complexo, num ponto elevado da usina. No fundo desta caçamba existe uma grade separadora que capta materiais finos e contaminantes que são descartados e retirados do processo.

O produto restante passa por aspersões e é umedecido com água sendo, na sequência, inserido em um britador de mandíbulas, onde é triturado.

O processo de beneficiamento prossegue com um curso do material sobre esteiras rolantes que circula sob uma estação imantada onde são removidos resíduos ferrosos. Em outros pontos desta esteira são realizadas novas operações de aspersão de água com a finalidade de diminuir a quantidade de poeira gerada durante o processo.

O material segue, então, para uma seleção em peneiras vibratórias, e por fim preparados, são depositados em baias de acordo com sua granulometria.

A partir deste ponto, foram colocados em sacos de nylon de 60 Kg e transportados em caminhão até o laboratório de Materiais de Construção da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), em Recife/PE.

As figuras a seguir ilustram o processo de beneficiamento do resíduo de construção e demolição descrito acima.



(a)



(b)

Figura 1 – Usina de Reciclagem: (a) Pátio e (b) Material “in natura”



(a)



(b)

Figura 2 – Processo de usinagem: (a) material depositado e (b) vibração na grade separadora



(a)



(b)

Figura 3 – Usinagem: (a) grade de separação de finos com aspersores e (b) sistema de vibração



(a)



(b)

Figura 4 – Detalhes do britador de mandíbulas: (a) Vista inferior e (b) Vista lateral dos “dentes”



(a)



(b)

Figura 5 – Estação imantada: (a) recolhimento de materiais ferrosos e (b) limpeza da estação



(a)



(b)

Figura 6 – Material usinado: (a) estação final e (b) baias separadoras

## **ANEXO 2**

## Anexo 2 – Legislação Vigente

### Legislação Nacional

Apesar dos RCDs serem um problema ambiental grave há muito tempo, a legislação dirigida a esse tipo de resíduos remonta apenas a 2003, com a Resolução nº 307 do CONAMA.

Até então, só com a criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, em 1981 é que foram legislados os resíduos sólidos urbanos, tendo contribuído para que os resíduos sólidos fossem referidos na Constituição de 1988.

É na Resolução nº 307, que são definidos os vários tipos de resíduos da construção mediante o seu potencial de reciclagem e reutilização, tal como já descrito no ponto referente aos RCD, ou seja: Resíduos de Classe A são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados; Resíduos de Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações; Resíduos de Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação; e Resíduos de Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção.

Na Resolução 307 é referido que os Municípios devem adotar políticas públicas e setoriais articuladas para a gestão dos RCD, utilizando a reciclagem em detrimento ao sistema de aterro.

Nesta Resolução é igualmente salientada a obrigatoriedade da elaboração do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil que deverá incluir o Programa municipal de gerenciamento de resíduos da Construção Civil, coordenado pelos municípios e pelo Distrito federal. Este plano deverá estabelecer as diretrizes técnicas assim como os procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores. Deverá incluir ainda projetos de gerenciamento dos resíduos de construção civil a serem elaborados e implantados pelos grandes geradores.

A Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, “institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos dispendo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis” (art.1)

Os princípios de base são (art.6): a prevenção e a precaução; o poluidor-pagador e o protetor-recebedor; a visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambientais, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública; o desenvolvimento sustentável; a eco-eficiência, mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta; a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade; a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos; o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania; o respeito às diversidades locais e regionais; o direito da sociedade à informação e ao controle social; a razoabilidade e a proporcionalidade.

Tem ainda os seguintes objetivos (art.7): proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços; adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais; redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos; incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados; gestão integrada de resíduos sólidos; articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos; capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos; regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização da prestação dos serviços públicos

de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira.

O Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, estabelece as normas para execução da Política Nacional de Resíduos Sólidos (art. 1). O decreto trata das responsabilidades dos Geradores de resíduos sólidos e do poder público e das diretrizes aplicáveis à gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, da participação dos catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis, dos planos de resíduos sólidos e dos planos de gerenciamento de resíduos sólidos.

Salienta-se que nas diretrizes aplicáveis neste último, define que deve ser dada a prioridade com a seguinte ordem: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

#### Legislação Estadual

Em 2010 foi publicada a Lei Ordinária Nº 14.236, que vem fazer a revisão da Lei nº 12.008 (2001) que dispunha sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e do Decreto nº 23.941 (2002), que regulamentava a Lei nº 12.008, criando uma Nova Política Estadual de Resíduos Sólidos. Este documento veio orientar as ações do Governo do Estado sobre planejamento e gestão de resíduos. Pretende também redefinir responsabilidades para os órgãos municipais de controle e execução dos resíduos no Estado.

A nova lei estabelece responsabilidades entre fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e consumidores no manejo de resíduos sólidos, pelo ciclo de vida dos produtos.

A Política Nacional de Resíduos sólidos prevê ainda soluções entre governos estaduais e municipais, no desenvolvimento de planos de resíduos sólidos, no prazo de 2 anos para a conclusão de diagnósticos e definição de metas, e identificar principais geradores de resíduos.

A lei obrigada o desenvolvimento de um plano nacional de resíduos sólidos há 20 anos, sendo revisto a cada quatro.

No dia 1º de Agosto de 2012 saiu o Decreto nº 38.483 que formaliza o Plano Estadual de Resíduos Sólidos. Este Plano explicita a implantação de aterros sanitários recuperando os lixões, conforme meta definida pelo Governo Federal para o Brasil. Esta implantação será realizada através do recebimento de fundos federais.

Com este Decreto são aprovados os Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos dos Municípios consorciados ao COMSUL (art. 1).

#### Legislação Nacional Municipal: Petrolina

No seguimento da Resolução nº 307 do CONAMA, e da necessidade de se criar critérios para a sua concretização, a Prefeitura de Petrolina realizou um plano de construção e implementação de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil. Pretendia assim diminuir o impacto ambiental causado pelos RCD, reaproveitando esses resíduos para a fabricação de novos produtos para a construção (SANTOS, 2008).

Um passo importante dado pela Prefeitura, no que toca aos resíduos sólidos, foi a implementação, em Janeiro de 2012, de um sistema de coleta seletiva. Este processo foi planejado em 3 fases, até atingir todo o município.