UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

FELIPE TORRES TAVARES CERVEIRA PROENÇA

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA O APROVEITAMENTO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO

Recife, PE
2012

UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

FELIPE TORRES TAVARES CERVEIRA PROENÇA

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA O APROVEITAMENTO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco - Programa de Pós-Graduação - PEC-POLI-UPE para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração:
Construção Civil

Orientadora:
Profa. Dra. Stela Fucale Sukar

Co-Orientadora:
Profa. Dra. Emília Rahnemay Kohlman Rabbani

Recife, PE
2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco –

P964a 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 / Felipe Torres Tavares Cerveira Proença. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2012.

120 f.

Orientadora: Dra Stela Fucale Sukar

Co-Orientadora: Dra Emília Rahnemay Kohlman Rabbani

Dissertação (Mestrado - Engenharia Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012.

1. Resíduo. 2. Reaproveitamento. 3. Construção civil. 4. Pavimentação. - Dissertação I. Sukar, Stela Fucale (orient.) II. Rabbani, Emília Rahnemay Kohlman (Co-orient.) III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD 624.01

FELIPE TORRES TAVARES CERVEIRA PROENÇA

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA O APROVEITAMENTO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Orientador:

_____

Profª Dra. Stela Fucale Sukar
Orientadora
Universidade de Pernambuco

Examinadores:

_____

Profº Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Examinador Interno
Universidade de Pernambuco

_____

Profº Dr. Silvio Romero de M. Ferreira
Examinador Externo
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profª Dra. Laura Maria Goretti da Motta
Examinadora Externa
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Recife, PE
2012

À minha mãe (Gisela), meus avôs,
à minha esposa (Elitânia) e
ao meu querido filho (Felipinho).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a *Deus*, pela oportunidade de obter novos conhecimentos, para seguir na minha carreira e conseguir meus objetivos.

À minha mãe *Gisela Torres de Lima*, pelo seu amor, incentivo e por sempre acreditar em mim.

À minha esposa *Elitânia de Lima Sá Proença*, pelo seu amor, companheirismo, incentivo e por sempre acreditar em mim.

Ao meu filho *Felipe Torres Tavares Sá Proença*, pelos momentos de felicidade e entretenimento durante a elaboração desta pesquisa.

Ao *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil* da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco.

À minha orientadora *Profa. Dra. Stela Fucale Sukar*, pela amizade, compreensão, oportunidade, atenção. Obrigado por sempre acreditar neste trabalho.

À minha co-orientadora *Profa. Dra. Emília Rahnemay Kohlman Rabbani*, pela compreensão, incentivo, sugestões, oportunidade, atenção.

Aos alunos de graduação, *Rebecca Carla França da Silva* e *Sidney Fernandes de Andrade Moura*, da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco e atuais Engenheiros, pela grande ajuda na execução dos ensaios e elaboração de trabalhos.

À *Profa. Maria da Conceição Justino de Andrade*, Gerente do Laboratório de Mecânica dos Solos - LMS da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco que disponibilizou o acesso aos fins de semana para a realização dos ensaios, como também, ao Laboratorista e Amigo *Fábio Ferreira*, pela grande ajuda na execução dos ensaios e orientações.

À Coordenadoria do Espaço Físico da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, em especial ao *Prof. Daniel*, que auxiliou com os veículos utilizados nas coletas dos materiais.

À Unidade de Beneficiamento de resíduos da construção civil - Ciclo Ambiental, bem como ao proprietário Rodrigo e seu gerente Marlos, que forneceu as amostras já beneficiadas, para a realização dos ensaios.

Aos *Profº's Dr. Silvio Romero de M. Ferreira* e *Dr. Alexandre Duarte Gusmão* pelas contribuições dadas durante o seminário de qualificação. Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco e secretária do PEC, pelos conhecimentos obtidos durante o mestrado, além de D. *Lúcia Rosani* pelas informações e auxílios prestados.

À Msc. *Clarissa Ribeiro de Sá Rodrigues* pelo apoio em diversos momentos do mestrado.

Aos amigos do mestrado, em especial à *Estefânio de Pontes, Felipe dos Santos Albuquerque, José Edival Moraes Filho, Kalline da Silva Almeida, Maria Cecília Araújo Santos* e *Victor Correia de Oliveira Almeida* pelo apoio e incentivo durante todo o mestrado.

Ao *Prof. José Orlando*, pelas orientações sobre a realização de alguns ensaios.

À *Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco* (*FACEPE*), pela bolsa de mestrado.

À *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* (*CAPES*), pela bolsa de mestrado, em substituição à bolsa disponibilizada pela FACEPE.

PROENÇA, F. T. T. C. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduos da construção civil para o aproveitamento em obras de pavimentação**. Recife: UPE, 2012. 120f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

RESUMO

O alto consumo de recursos naturais e a elevada geração de Resíduos da Construção Civil (RCC) causam problemas ambientais, econômicos e sociais. Portanto, torna-se necessário buscar alternativas técnicas, para minimizar a geração ou reaproveitá-los, tal como produzir agregados reciclados de RCC para aplicação em camadas da infra-estrutura dos pavimentos. Esta pesquisa analisa em laboratório propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de RCC gerados na cidade de Recife – PE, para ser empregado em camadas de base e sub-base em obras de pavimentação de baixo volume de tráfego, em substituição aos agregados naturais usados em vias urbanas. A metodologia desta pesquisa consistiu em levantamento bibliográfico; coleta de amostras de RCC beneficiadas numa usina de reciclagem na Região Metropolitana do Recife, proveniente de fase intermediária (estrutura de concreto com alvenaria de vedação em tijolos cerâmicos) de obras de construção civil; ensaios de caracterização física (composição gravimétrica, granulometria, massa específica, absorção, forma e compactação) e caracterização mecânica dos agregados para uso em pavimentação (Índice de Suporte Califórnia - ISC), sendo utilizadas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como referência. Nos resultados obtidos, verificou-se que o agregado de RCC investigado pode ser reaproveitado para a aplicação proposta nesta pesquisa. Houve baixa presença de contaminantes, variando de 0,1% a 3,9%; a granulometria passou a ser bem graduada; aumentou-se a fração cúbica dos grãos; com valores máximos de massas específicas dos grãos passantes (2,79 kg/dm³) e retidos (2,64 kg/dm³); e pesos específicos aparente secos máximos na compactação nas energias intermediária (17,4 kN/m³) e modificada (18,1 kN/m³). Os valores do ISC, na energia intermediária, ficaram entre 47,0% e 95,2% (com possibilidade de aplicação para reforço do subleito até base), já na energia modificada, foram obtidos valores acima de 60%, o que atende a norma para o uso em todas as camadas de pavimentos, sendo um benefício ambiental.

Palavras-chave: Construção civil. Resíduo. Reaproveitamento. Pavimentação.

PROENÇA, F. T. T. C. **Analysis of physical and mechanical properties of recycled aggregates from construction waste in order to use the paving work.** Recife: UPE, 2012. 120f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

ABSTRACT

The high consumption of natural resources and high generation from Civil Construction Waste (CCW) cause environmental problems, economic and social. Therefore, it is necessary to search for alternative techniques to minimize the generation or recycles them to produce aggregates RCC for application to the pavement layers infrastructure. This research analyzes in the laboratory physical and mechanical properties of recycled aggregate CCW generated in Recife - PE, to be used in base layers and sub-base for paving low-volume traffic, replacing the natural aggregates used in urban roads. The methodology of this research consisted of literature review, collection of samples of CCW benefit from a recycling plant in the Metropolitan Region of Recife, from the intermediate stage (concrete frame with masonry sealing bricks) for building works; characterization tests physical (gravimetric composition, particle size, density, absorption, shape and compaction) and the mechanical properties of aggregates for use in paving (Index Support California - ISC), the standards being used by the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT) as a reference . The results obtained showed that the addition of CCW investigated can be reused for the proposed application in this study. There was a low presence of contaminants, ranging from 0,1% to 3,9%, the grain has come to be graded, increased the fraction of cubic grains, the maximum values of densities of passers grain (2,79 kg / dm³) and retained (2,64 kg / dm³), the apparent specific gravities maximum dry compression in the intermediate energy (17,4 kN/m³) and modified (18,1 kN/m³). The ,values of ISC in the intermediate energy were between 47,0% and 95,2% (with application from strengthening the subgrade to the base), since the modified energy were above 60%, which meets the standard for the use in pavement layers, and an environmental benefit.

Keywords: Civil Construction. Waste. Reuse. Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Geração de RCD no Brasil – A visão do SINDUSCON-SP – (Adaptada de CORRÊA *et al*., 2009)..... 29
Figura 2.2 – Granulometria do agregado reciclado de RCC em cada fase de obra (CARNEIRO, 2005)..... 38
Figura 2.3 – Granulometria do agregado reciclado da amostra analisada (ULSEN, 2006)..... 39
Figura 2.4 – Granulometria original do agregado reciclado de RCC da amostra analisada por Leite (2007)..... 40
Figura 2.5 – Granulometria original e influenciada pela compactação do RCC (MOTTA, 2005)..... 44
Figura 2.6 – Granulometria original e influenciada pela compactação do RCC (LEITE, 2007)..... 45
Figura 2.7 – Seção transversal do pavimento (DNIT, 2006)..... 46
Figura 2.8 – Estruturas de pavimentos rígidos (BERNUCCI *et al*., 2006)..... 47
Figura 2.9 – Pavimento de concreto de cimento Portland - Estrutura de pavimento-tipo (BERNUCCI *et al*., 2006)..... 47
Figura 2.10 – Pavimento de concreto de cimento Portland - Estrutura de pavimento-tipo (IME, 2008)..... 48
Figura 2.11 – Estruturas de pavimentos flexível (BERNUCCI *et al*., 2006)..... 48
Figura 2.12 – Estruturas de pavimentos flexível (IME, 2006)..... 49
Figura 2.13 – Ilustração do sistema de camadas de um pavimento flexível e tensões solicitantes (ALBERNAZ, 1997 apud BERNUCCI *et al*., 2006)..... 49
Figura 4.1 – Composição gravimétrica do agregado reciclado de RCC das amostras estudadas..... 79
Figura 4.2 – Teor de absorção influenciado pelos constituintes do agregado reciclado de. RCC..... 84
Figura 4.3 – Granulometria original do agregado reciclado de RCC..... 85
Figura 4.4 – Curvas de compactação para energias intermediária e modificada..... 88
Figura 4.5 – Comparações das curvas de compactação para energias intermediária e modificada..... 89

Figura 4.6 – Curvas granulométricas original e pós compactação, na umidade ótima e ao final do ensaio, com energias intermediária e modificada das amostras estudadas 92
Figura 4.7 – Comparação do teor dos constituintes com ISC na aplicação de energias intermediária e modificada..... 101

LISTA DE FOTOS

Foto 2.1 – Resíduos da Construção Civil (RCC) da usina de beneficiamento, localizada em Camaragibe – PE..... 24
Foto 2.2 – Corpo de prova rompido em ensaio de resistência à tração por compressão diametral (MOTTA, 2005)..... 58
Foto 2.3 – Execução de ensaio de resistência por compressão simples (MOTTA, 2005)..... 59
Foto 3.1 – Usina de Beneficiamento de Resíduos da Construção Civil..... 61
Foto 3.2 – Coleta do material na usina de beneficiamento em Camaragibe – PE..... 62
Foto 3.3 – Material homogeneizado e espalhado no laboratório antes dos ensaios..... 63
Foto 3.4 – Separação por classe de natureza do agregado reciclado – Ensaio de Composição Gravimétrica..... 65
Foto 3.5 – Visualização por classe de natureza do agregado reciclado – Ensaio de Composição Gravimétrica..... 65
Foto 3.6 – Preparação das amostras para massa específica do material passante na peneira 4,8 mm..... 67
Foto 3.7 – Procedimento de retirada de ar entre as partículas com uso de picnômetro e bomba à vácuo..... 67
Foto 3.8 – Imersão em água destilada das partículas dos agregados reciclados retidas na peneira 4,8 mm..... 68
Foto 3.9 – Pesagem da amostra das partículas dos agregados reciclados retidas na peneira 4,8 mm, após imersão em água destilada durante 24 horas..... 69
Foto 3.10 – Etapa do ensaio de absorção com amostra de agregado reciclado da fração retida na peneira 4,8 mm, imersa em água destilada..... 70
Foto 3.11 – Exemplos de frações granulométricas miúdas de uma das amostras de agregados reciclados de RCC deste estudo..... 71
Foto 3.12 – Exemplos de frações granulométricas graúdas de uma das amostras de agregados reciclados de RCC deste estudo..... 71
Foto 3.13 – Ilustração da realização do ensaio de índice de forma dos agregados graúdos desta pesquisa..... 73

Foto 3.14 – Exemplo das formas das partículas antes da compactação..... 73
Foto 3.15 – Execução do ensaio de compactação..... 74
Foto 3.16 – Desmoldagem do corpo de prova após a execução do ensaio de compactação..... 75
Foto 3.17 – Corpo de prova após execução do ensaio de compactação..... 75
Foto 3.18 – Compactação de corpo de prova..... 76
Foto 3.19 – Imersão dos corpos de prova do ensaio de ISC..... 77
Foto 3.20 – Corpo de prova submetido ao carregamento (A) e leitura da penetração no extensômetro (B) do ensaio de ISC..... 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros para agregados reciclados de RCC em camadas de pavimentação, segundo a NBR 15115 (ABNT, 2004)..... 33
Tabela 2.2 – Constituição gravimétrica de pesquisas realizadas aplicando agregados reciclados de RCC..... 34
Tabela 2.3 – Porcentagem de teor de material indesejável em pesquisas para uso de RCC. 35
Tabela 2.4 – Massa específica de agregados reciclado e natural..... 35
Tabela 2.5 – Massas específicas de agregados reciclados em diferentes pesquisas..... 36
Tabela 2.6 – Teor de absorção das amostras originais do RCC por pesquisa..... 37
Tabela 2.7 –Aspectos e limites fixados pela norma do Município de São Paulo com relação à granulometria..... 40
Tabela 2.8 – Valores dos parâmetros de compactação para agregados reciclados em pesquisas realizadas..... 43
Tabela 2.9 – Valores mínimos de ISC e máximos de expansão recomendados para emprego de agregado reciclado de RCC em camadas de pavimentos..... 54
Tabela 2.10 – Valores de ISC e expansão de pesquisas utilizando agregados reciclados de RCC..... 60
Tabela 3.1 – Resumo dos períodos de coletas das amostras de agregado reciclado..... 62
Tabela 3.2 – Resumo dos ensaios realizados nas amostras de agregado reciclado desta pesquisa..... 64
Tabela 3.3 – Classificação da forma dos grãos conforme NBR 6954 (ABNT, 1989)..... 73
Tabela 4.1 – Resumo da composição gravimétrica das amostras: composição por constituinte, média e desvio padrão..... 80
Tabela 4.2 – Massa específica média das partículas passantes e retidas na peneira 4,8 mm, de cada coleta do agregado reciclado..... 81
Tabela 4.3 – Massa específica das partículas retidas na peneira 4,8 mm das amostras coletadas dos agregados reciclados, conforme cada natureza dos constituintes..... 82
Tabela 4.4 – Teor de absorção das partículas retidas na peneira 4,8 mm dos agregados reciclados por constituinte e da material total..... 83

Tabela 4.5 – Distribuição das frações (%) da curva granulométrica original das amostras..... 85
Tabela 4.6 – Parâmetros obtidos da curva granulométrica original das amostras..... 86
Tabela 4.7 – Forma das partículas em percentual para as amostras de agregado reciclado de RCC..... 86
Tabela 4.8 – Peso específico aparente seco e umidade ótima para as amostras de agregado reciclado..... 91
Tabela 4.9 – Comparação dos parâmetros da curva granulométrica antes e após a compactação..... 96
Tabela 4.10 – Percentual passante na peneira 0,075 mm nas amostras original e pós compactação (na umidade ótima e ao final)..... 97
Tabela 4.11 – Forma das partículas dos agregados reciclados de RCC antes e após compactação..... 98
Tabela 4.12 – Valores de ISC e expansão do material com aplicação de energias intermediária e modificada..... 99

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Algumas pesquisas realizadas sobre aplicações de RCC..... 31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ALT-MAT – Alternative Materials in Road Construction.

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado à Quente.

CBR – California Bearing Ratio.

CNT – Confederação Nacional do Meio Ambiente.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rolagem.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EMLURB - Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana do Recife.

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo.

IME – Instituto Militar de Engenharia.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

ISC – Índice Suporte Califórnia.

PIB – Produto Interno Bruto.

PMBH – Prefeitura do Município de Belo Horizonte.

PMSP – Prefeitura do Município de São Paulo.

RCC – Resíduo(s) da Construção Civil.

RCD – Resíduo(s) da Construção e Demolição.

RMR – Região Metropolitana do Recife.

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos.

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil.

SINDUSCON – Sindicato da Indústria da Construção Civil.

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**19**
1.1	**Considerações iniciais**	**19**
1.2	**Justificativa**	**20**
1.3	**Objetivo**	**21**
1.3.1	**Objetivo Geral**	**21**
1.3.2	**Objetivos Específicos**	**22**
1.4	**Metodologia**	**22**
1.5	**Estrutura da Dissertação**	**23**
2	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	**24**
2.1	**Resíduos da Construção Civil**	**24**
2.1.1	**Definições**	**24**
2.2	**Gerenciamento de RCC**	**27**
2.3	**Reciclagem de Resíduos da Construção Civil**	**29**
2.4	**Possíveis empregos para o agregado reciclado**	**30**
2.5	**Propriedades do agregado reciclado de RCC**	**32**
2.5.1	**Propriedades físicas**	**33**
2.5.1.1	**Composição gravimétrica**	**33**
2.5.1.2	**Teor de materiais indesejáveis**	**34**
2.5.1.3	**Massa específica das partículas**	**35**
2.5.1.4	**Absorção de água**	**36**
2.5.1.5	**Granulometria**	**38**
2.5.1.6	**Índice de forma**	**41**
2.5.1.7	**Compactação**	**42**
2.6	**Pavimentação**	**45**
2.6.1	**Definições**	**45**
2.6.2	**Normas e propriedades dos materiais de camadas de pavimentos**	**50**
2.6.3	**Propriedades mecânicas dos materiais de base, sub-base e reforço do subleito**	**53**
2.6.3.1	**Índice de Suporte Califórnia (California Bearing Ratio)**	**53**
2.6.3.2	**Módulo de resiliência**	**54**
2.6.3.3	**Deformação permanente**	**56**
2.6.3.4	**Outros ensaios mecânicos**	**57**

2.6.4 Pesquisas realizadas sobre aplicações de ISC em Agregados Reciclados de RCC59
3 METERIAIS E MÉTODOS 61
3.1 Coleta de amostra 61
3.2 Ensaios laboratoriais 64
3.2.1 Caracterização física 64
3.2.1.1 Composição gravimétrica 64
3.2.1.2 Materiais indesejáveis 66
3.2.1.3 Massa específica das partículas dos agregados 66
3.2.1.4 Absorção 69
3.2.1.5 Análise granulométrica 70
3.2.1.6 Forma dos grãos 72
3.2.1.7 Ensaios de compactação 73
3.3 Caracterização mecânica 75
3.3.1 Índice de suporte Califórnia 76
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 78
4.1 Caracterização física do agregado reciclado 78
4.1.1 Composição gravimétrica e Teor de materiais indesejáveis 78
4.1.2 Massa específica das partículas dos agregados 81
4.1.3 Absorção 83
4.1.4 Granulometria 84
4.1.5 Análise da forma 86
4.1.6 Ensaio de compactação 87
4.1.6.1 Influência da compactação na granulometria e forma dos agregados 91
4.2 Ensaio mecânico 98
4.2.1 Índice de Suporte Califórnia 98
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS 102
5.1 Conclusões 102
5.2 Propostas de futuras pesquisas 104
REFERÊNCIAS 105

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O setor da construção civil no Brasil promoveu um aumento do percentual de participação no Produto Interno Bruto (PIB) de 11,9%, em 2008, para 12,2% em 2009 (FIESP, 2010). Este desenvolvimento, contudo, causa também grandes impactos no meio ambiente devido ao consumo elevado de matérias primas e descarte irregular de Resíduo de Construção Civil (RCC).

O grande consumo de recursos naturais pela construção civil, entre 20 e 50% do total utilizado, de acordo com John (2000), mostra a importância da busca por alternativas sustentáveis, tais como o emprego de Resíduos da Construção Civil (RCC) em obras de pavimentação, fundação (melhoramento de solo), produção de blocos de concreto, concreto, argamassa, dentre outros.

Outro fator relevante é o custo de pavimentação, com serviços onerosos como, por exemplo, base e sub-base em brita corrida de agregado natural custam R$125,02/m³, conforme dados de junho de 2012 do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil índices da construção civil (SINAPI, 2012).

Já segundo levantamento realizado por Motta, em 2005, a Prefeitura Municipal de São Paulo executa um metro cúbico de base, com agregado reciclado, com valor inferior em 18%, em relação ao mesmo serviço utilizando brita graduada simples.

A Prefeitura de São Paulo economiza 37% com reciclagem de resíduos da construção e tem produção mensal de 250 m³, no bairro Jabaquara. Na Prefeitura de São Carlos a reciclagem economiza 25% do valor que seria gasto com a remoção e tratamento, reciclando os resíduos, ainda foi informado que o custo para o município dos agregados reciclados foi 80% do valor dos agregados naturais (BASÍLIO, 2011).

Uma possível destinação dos RCC no Brasil seria a aplicação em vias locais, como também, poderia ser aplicável para manter e melhorar as condições dos pavimentos, a partir de reparos ou

revestimentos novos, combatendo desta maneira a deterioração das vias, que muitas vezes é causada pelas condições climáticas atuantes, execuções errôneas e a falta de manutenções, que reduzem o desempenho e a vida útil do pavimento.

No Brasil, conforme dados de 2011 da Confederação Nacional do Transporte (CNT), existem muitas vias no Brasil sem pavimentação. Em janeiro de 2011, foi verificado que dos 1.580.9641 quilômetros de estradas, somente 13,5% (212.738 quilômetros) estavam pavimentados, ou seja, 1.261.745 quilômetros não possuíam pavimentação (CNT, 2011). Verifica-se assim que há uma quantidade significativa da malha viária ainda em terra batida ou cascalhada, sobretudo em bairros mais pobres.

Diversas pesquisas foram conduzidas por vários autores para verificar a viabilidade do uso de RCC em aplicações de engenharia, visando, desta maneira, uma construção mais sustentável, tais como, pavimentação (TRICHÊS; KRYCKYJ, 1999; DIAS, 2004; FERNANDES, 2004; MOTTA, 2005; HOOD, 2006; LEITE, 2007; GRUBBA, 2009; NÓBREGA; MELO, 2009; SILVA, 2009), concreto (LEVY, 1997; ZORDAN, 1997; CHINI *et al*., 2001; LEITE, 2001; LEVY, 2001; VIEIRA, 2003; BUTTLER, 2007; RODRIGUES, 2011), argamassa (MIRANDA, 2000; BERNHOEFT, 2010), camada drenante de pavimentos (AFFONSO, 2005), estaca de compactação (LIRA JR., 2010), reforço de solos (SANTOS, 2007), e, por fim, estudo e caracterização do RCC (ANGULO, 2000; JOHN, 2000; CARNEIRO *et al*., 2004).

1.2 Justificativa

A apreensão com os passivos ambientais e com a destinação apropriada da elevada quantidade de resíduos provenientes da construção civil estimula os estudos na área de reciclagem destes resíduos. Sendo assim, a aplicação do agregado reciclado de RCC em pavimentos apresenta benefícios e atrativos, tais como:

i. redução dos impactos ambientais, visto que em Recife - PE, por exemplo, foram geradas, entre 3.000 e 4.000 ton/dia de RCC (GUSMÃO, 2008);

ii. redução dos custos de pavimentação, pois estes materiais têm preços menores em relação aos convencionais (não considerando os gastos com transporte), e dos custos operacionais de aterros sanitários, porque haverá menor quantidade de resíduo envolvido;
iii. expansibilidade muito baixa ou nula, ou seja, com a entrada de água ou "saturação", não há expansão das camadas compactadas;
iv. as manutenções dos aterros sanitários e de áreas especiais para o descarte precisarão de áreas menores, com a prática de reciclagem dos RCC;
v. economia com a limpeza urbana, contribuindo com sistemas municipais de gestão de resíduos sólidos, já que com a correta destinação e reaproveitamento de RCC, estes poderão ser destinados em áreas próprias para recebimento de resíduos, podendo reduzir custos de captação e transporte por parte de empresas que prestam serviços à administração pública;
vi. possibilitar a redução da quantidade de vias não pavimentadas no Brasil (86,5%) do total das vias (CNT, 2011);
vii. compor embasamento teórico para apresentar as características do resíduos da construção civil da RMR e, assim, possibilitar o uso de um material de melhor qualidade dos agregado reciclados na região;
viii. possibilitar a pavimentação e manutenção das vias locais não pavimentadas, cerca de 700 km, pela Prefeitura de Recife, utiliza materiais de aterros ou resíduos (EMLURB, 2012).

Espera-se que com os resultados da presente pesquisa, o uso de agregado reciclado de RCC em vias de baixo volume de tráfego aumente na RMR, como também, que seja realizado um correto beneficiamento destes resíduos na região.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo Geral

A presente pesquisa tem como objetivo geral analisar em laboratório as propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de Resíduos da Construção Civil (RCC), gerados na Região Metropolitana do Recife (RMR), para aplicação em obras de pavimentação, como material de camada de base e sub-base, em vias de baixo volume de tráfego.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste projeto consistem:

i. realizar levantamento sobre o estado de arte para compor embasamento teórico sobre a temática de RCC e sua aplicação como agregados reciclados em pavimentação;

ii. analisar as propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados de RCC da RMR para identificar o potencial de reciclagem para a aplicação em pavimentação;

iii. verificar a influência da energia de compactação, com reuso e na umidade ótima, nas propriedades físicas e mecânicas do agregado reciclado;

iv. fazer uma comparação entre dados obtidos da pesquisa com os existentes em norma e literatura.

1.4 Metodologia

A metodologia adotada para a consecução dos objetivos constou de forma resumida dos seguintes itens:

i. revisão bibliográfica sobre os temas envolvidos, reunindo informações de publicações nacionais e internacionais, e também informações de relatórios técnicos;

ii. coleta de 05 (cinco) amostras de RCC em uma usina de beneficiamento, localizada na cidade de Camaragibe-PE;

iii. homogeneização e separação das amostras para realização de ensaios de caracterização física e mecânica;

iv. realização de ensaios de caracterização física (composição gravimétrica; teor de materiais indesejáveis; análise granulométrica; índice de forma; compactação; massa específica das partículas graúda e miúda; e absorção) das amostras coletadas de RCC;

v. realização de ensaios de caracterização mecânica (Índice de Suporte Califórnia) das amostras dos agregados reciclados; e

vi. análise e interpretação dos resultados obtidos.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos.

O Capítulo 1 mostra uma breve introdução, bem como objetivos, metodologia e estrutura da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre o tema de resíduos da construção civil, além de uma abordagem sobre as pesquisas relacionadas com o uso de RCC, como também, sobre pavimentação.

O Capítulo 3 trata dos materiais e métodos, onde são apresentados os procedimentos de coleta, preparação e realização dos ensaios laboratoriais.

O Capítulo 4 abrange a apresentação e análise dos resultados obtidos dos ensaios em laboratório de caracterização física e mecânica em amostras recicladas de RCC deste estudo.

Por fim tem-se o Capítulo 5 que apresenta a conclusão sobre os resultados obtidos nesta pesquisa, como também, algumas recomendações para a aplicação de agregado reciclado de RCC em camadas de pavimentos e sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos da Construção Civil

2.1.1 Definições

Atividades executadas na indústria da construção civil, como construções, demolições, reformas e reparos apresentam, freqüentemente, sobras e desperdícios, muitas vezes devido a não racionalização dos procedimentos executivos.

A geração dos Resíduos da Construção Civil (RCC) representa dois terços do total de resíduos sólidos urbanos gerados nas cidades (PINTO, 2000). Segundo Pinto (2005), a geração internacional de resíduos varia de 163 a mais de 300 quilos por habitante/ano. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) verificou um aumento na geração de resíduos da construção civil, o qual houve um acréscimo de 8,7% no ano de 2010, em relação a 2009, na coleta de resíduos pelos municípios brasileiros, considerando apenas aqueles que foram descartados e coletados de logradouros públicos (ABRELPE, 2010). A Foto 2.1 ilustra um exemplo de resíduos da construção civil da usina de beneficiamento, localizada em Camaragibe - PE.

Foto 2.1 – Resíduos da Construção Civil (RCC) da usina de beneficiamento, localizada em Camaragibe – PE.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) define os resíduos sólidos como aqueles materiais nos estados sólidos e semi-sólidos, gerados de atividades: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, sendo classificados como perigosos e não-perigosos:

- Classe I: Também chamados de perigosos, são aqueles que apresentam periculosidade, ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxidade, patogenicidade;
- Classe II: denominados de não-perigosos. São subdivididos em duas classes:
  a) *Classe II-a:* não-inerte, podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegrabilidade ou solubilidade em água.
  b) *Classe II-b*: inertes, são aqueles que quando submetidos a testes de solubilização não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

A Resolução CONAMA nº 307 (2002) define os Resíduos da Construção Civil, normalmente, conhecidos como entulhos de obras, caliça ou metralha, como aqueles que são os derivados de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, além daqueles resultantes da preparação e da escavação e limpeza 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 e fiação elétrica.

O aproveitamento de resíduos é realizado a partir de reutilização e reciclagem que, segundo a Resolução nº 307 do CONAMA (2002), apresenta as seguintes definições:

- Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto;
- 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.

A referida Resolução estabelece diretrizes, critérios e métodos para a gestão de Resíduos da Construção Civil e define que os mesmos sejam subdivididos em quatro classes (A, B C e D), conforme descrição a seguir:

- Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
  a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
  b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
  c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.
- Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros, a qual foi atualizada pela Resolução CONAMA nº 431 de 24 de maio de 2011, retirando o gesso da classe C e incluindo-o nesta classe: estes são materiais recicláveis, contudo com outros fins, dentre os quais fazem parte "plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e gesso";
- Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;
- Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Os RCC classificados como agregados reciclados (Classe A) podem ser aplicados como agregados miúdos e graúdos como, por exemplo, em concretos sem função estrutural (ZORDAN, 1997; LEITE, 2001; BUTTLER, 2003; CARRIJO, 2005; FONSECA, 2006; RODRIGUES, 2011), sub-bases e bases de pavimentos (MOTTA, 2005; LEITE, 2007; NÓBREGA; MELO, 2009), misturas betuminosas (SILVA, 2009), camadas de aterros de resíduos sólidos (AFFONSO, 2005), obras de reforços de solos (FUCALE; MEDEIROS JUNIOR, 2009), estacas de compactação (LIRA JR., 2010; MEDEIROS JR. *et al*., 2010), dentre outros.

2.2 Gerenciamento de RCC

A geração de RCC deve ser evitada, preferencialmente, e caso não seja possível têm-se que realizar outras etapas como: redução, reutilização, reciclagem e destinação final (Resolução CONAMA nº 307, 2002).

Países desenvolvidos, a exemplo do Japão, foram precursores no gerenciamento dos resíduos, devido ao pouco espaço físico e à escassa quantidade de matérias-primas (MOTTA, 2005). No Japão, por exemplo, há uma Lei de Limpeza e Tratamento de Resíduos (POON, 1997 *apud* MOTTA, 2005), que objetiva a diminuição dos resíduos, como também, a reintegração correta dos mesmos com deposição adequada e reutilização dos entulhos.

Ainda segundo Motta (2005), vários países da Europa não permitem a destinação de RCC em aterros e para estimular a reciclagem foram criadas novas normas, e também criação de taxas. Além disto, ou para realizar uma desconstrução de edificações, era imprescindível que se indicasse para os governantes a destinação correta dos entulhos com seu respectivo tratamento.

No Brasil, segundo Marques Neto (2005), a má execução de serviços como obras viárias, escavações, construção, reparos ou demolição de edificações; causa um grande desperdício dos materiais utilizados. Estima-se que a geração de RCC no Brasil apresenta-se na proporção de 2:1 para os resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo a grande produtora de resíduos as atividades de demolição, pois gera elevadas quantidades de entulhos misturados, que podem ou não facilitar a sua reutilização através de processos de separação.

Levy (2001) informou que em São Paulo-SP 60% dos resíduos gerados/coletados correspondiam a novas obras, em oposição ao que ocorre em cidades européias, onde a maior parte da geração é proveniente de demolições. As coletas realizadas pelas prefeituras de RCC em relação aos Resíduos Sólidos Urbanos correspondem a 1/3 (33,3%), desconsiderada a ação dos agentes particulares (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2010).

Em 2003 a produção de resíduos de construção em São Paulo atingiu em torno de 16.000 toneladas/dia, conforme Schneider (2003). Acredita-se que apenas 33% destes resíduos foram para os locais destinados para deposição, ou seja, 67% foram depositados em locais impróprios.

Na cidade do Recife - PE, Carneiro *et al*. (2004), afirmaram a partir de questionários realizados com empresas licenciadas, que tinha-se um volume de 1.260 m³/dia. Foi observado que na região abrangendo Recife, Jaboatão e Olinda havia muitos pontos críticos de deposição clandestina, dentre os quais foram contabilizados 174 locais. A situação agravou-se, visto que o local destinado para deposição de RCC, o aterro da Muribeca, foi desativado em meados de 2009.

Gusmão (2008) realizou uma estimativa da geração de RCC na cidade do Recife, através de pesquisas e dados do Aterro controlado da Muribeca/PE, verificando que a geração *per capita* na cidade, corresponde a 280 kg/hab/ano.

Estima-se que cerca de 1.000 toneladas/dia são destinadas a uma Usina de Reciclagem, localizada em Camaragibe-PE, em operação desde agosto de 2010. A produção da usina em 2012 está em torno de 6.000 toneladas/mês, sendo 200 toneladas/dia. Há ainda dois aterros sanitários, um localizado em Jaboatão dos Guararapes-PE e o outro em Igarassu - PE, também estão licenciados para receber os RCC (SILVA, 2010).

De acordo com Gusmão (2008), a maior parte dos resíduos da construção civil é gerada por desperdícios de materiais ocasionados pela aplicação de técnicas e tecnologias ultrapassadas com processos rudimentares.

Segundo Corrêa *et al.* (2009), considerando a média de geração de RCC no Brasil, a geração de RCC foi de 61% de RCC, o que equivale a valores entre 230 e 760 kg/hab/ano, além de 28% de resíduos urbanos. A Figura 2.1 apresenta os percentuais de 2009 de serviços que geram os resíduos em São Paulo, indicando que reformas é o serviço que mais gera resíduos (59%).

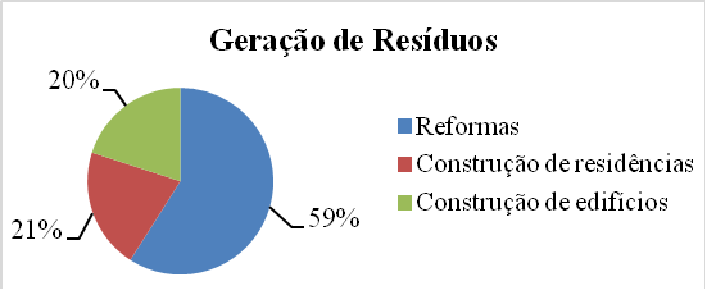

Figura 2.1 – Geração de RCD no Brasil – A visão do SINDUSCON-SP – (Adaptada de CORRÊA *et al*., 2009).

2.3 Reciclagem de Resíduos da Construção Civil

O processo de reciclagem é realizado com a britagem do RCC classe A pré-selecionado, a partir da retirada manual ou mecânica dos materiais indesejáveis (vidro, metais, borracha, gesso e madeira) e por separação magnética dos componentes metálicos, ocasionando a diminuição dos grãos para produzir o agregado reciclado (ANGULO, 2005).

A coleta do material pode seguir alguns procedimentos como informa o Método para coleta de amostras de solos para análise da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2012), como por exemplo, utilizar recipientes identificados e questionário de identificação da amostra.

Segundo Bodi *et al.* (1995), é possível reciclar quase 80% de RCC gerado. Já conforme ALT-MAT - *Alternative Materials in Road Construction* (1999), podem ser utilizados até 90% dos resíduos e existe a possibilidade do uso de agregados reciclados em substituição total ou parte dos agregados naturais. Em pesquisa realizada por Carneiro, em 2005 no Recife, constatou que os materiais presentes nos resíduos podem ser utilizados como agregados reciclados.

Apesar do alto potencial de reciclagem dos RCC, de acordo com Motta (2005), o Brasil teve uma taxa de reciclagem dos resíduos de construção abaixo de 5% em relação aos recicláveis. Somente, em Belo Horizonte (MG) que foi a pioneira, onde havia duas usinas de reciclagem de RCC municipais, que processavam cerca 25% do resíduo coletado ou 350 toneladas diárias de resíduo. Hoje, conforme dados da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PMBH) existem 03 estações

de reciclagem de Entulho: Pampulha, Estoril, Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 (PMBH, 2012).

A variabilidade dos quantitativos das taxas de reutilização deve-se à existência de leis diferentes, produção em menor quantidade de resíduos, além de maior oferta de recursos naturais em cada local (SCHNEIDER, 2003). Rosa (2005) constatou que no Brasil ainda há uma baixa taxa de reciclagem, sendo portanto, necessários avanços na política e investimentos nesta área.

O futuro da reciclagem no Brasil é bem promissor por causa das novas leis ambientais mais atuantes e severas, no intuito de se evitar impactos ambientais, além do fato da insuficiência dos recursos naturais em muitos locais, especialmente na região Norte.

Luz *et al.* (2004) afirmam que os benefícios da reciclagem são:

- redução da utilização de aterros;
- menor ocorrência de deposições irregulares;
- redução no consumo de recursos naturais não-renováveis;
- redução dos impactos ambientais das atividades de mineração;
- Esses benefícios só poderão ser atingidos por meio da reciclagem intensiva.

É importante ressaltar que para se utilizar agregados reciclados é necessário que o produto passe confiança aos usuários. Para isto, torna-se imprescindível que haja melhorias na gestão do processo de reciclagem desde o controle de qualidade até avanços na tecnologia de beneficiamento (ANGULO *et al.*, 2002).

2.4 Possíveis empregos para o agregado reciclado

Algumas pesquisas vêm sendo realizadas para analisar as características do RCC a fim de verificar possíveis aplicações na Engenharia. O Quadro 2.1 apresenta algumas pesquisas sobre este assunto.

Quadro 2.1 – Algumas pesquisas realizadas sobre aplicações de RCC.

Local	Aplicação	Observação	Fonte
Brasil	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 RCC para uso em argamassas e concreto.	Viabilidade do agregados reciclados em todas as propriedades analisadas	Angulo (2000)
	Novas rodovias e recuperação de antigas num total de 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 e aplicação do agregados reciclados em propriedades de pavimentação analisadas.	Fernandes (2004), Motta (2005), Leite (2007)
	Construção de via rodoviária.	Comportamento mecânico do agregado reciclado	Grubba (2009)
Europa	Obras em concreto: uma laje submersa (1988) numa hidrovia e estrutura do centro de tratamento de água (1999-2000).	Obtenção de desempenho satisfatório em ambientes agressivos.	Levy (2001)
Holanda	Em sub-base de pavimentos.	Viabilidade do agregados reciclados em propriedades de pavimentação analisadas, como forma e teor de material indesejável.	Hendricks e Janssen (2001)
Itália	Pavimentação	Viabilidade do agregados reciclados em propriedades de pavimentação analisadas, como forma e composição do componentes.	Costa e Ursella (2003)

Algumas pesquisas recentes vêm sendo realizadas na Cidade de Recife sobre o desempenho do RCC em aplicações como, estacas de compactação (LIRA JR., 2010; MEDEIROS JR., 2009; SILVA, 2009), reforço de solo (MACEDO, 2008), concreto (RODRIGUES, 2011).

Lira Jr. (2010) analisou as propriedades do RCC através de ensaios laboratoriais e de campo, onde foram realizadas sondagens à percussão e provas de carga sobre placa em estacas produzidas com agregados naturais e reciclados (RCC). Os resultados apontaram que tanto para os ensaios realizados em laboratório quanto *in situ*, o material reciclado apresentou-se

satisfatório, e até superior ao agregado comumente utilizado em estacas de compactação (areia ou pó de pedra).

Foi analisado o desempenho do uso de RCC em estrutura de concreto não estrutural por Rodrigues (2011), através de ensaios laboratoriais, concluindo que é viável utilizar o agregado miúdo reciclado de RCC sem grandes prejuízos nas suas propriedades mecânicas. Contudo, o uso em concreto com função estrutural depende do controle na dosagem e aprofundamento nos estudos relativos à durabilidade este material.

Há inúmeras vantagens quando se trata de reutilização e reciclagem de RCC. Os agregados reciclados podem se tornar fonte de diminuição de despesas (gerenciamento de resíduos, custos de transporte, taxas e multas) e faturamento. No aspecto ambiental, com a utilização dos agregados reciclados, diminui-se a exploração de recursos naturais, os impactos causados pelos RCC por depósitos em locais inadequados, desafogando os aterros. Além de benefícios econômicos e ambientais, os RCC também trazem benefícios sociais, pois a reutilização e reciclagem dos resíduos são uma fonte de geração de empregos (CARNEIRO *et al*., 2001; USLEN, 2006; SANTOS, 2007).

2.5 Propriedades do agregado reciclado de RCC

As propriedades dos agregados influenciam bastante no desempenho das camadas de pavimentação. Parâmetros como teor de material indesejável, forma dos grãos e granulometria tem valores limites indicados na NBR 15115 (ABNT, 2004), por exemplo, para utilização do material nesta aplicação.

A NBR 15115 (ABNT, 2004) estabelece como parâmetros de granulometria, teor de materiais indesejáveis, forma dos grãos, índice de suporte Califórnia e expansibilidade do material, os valores apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Parâmetros para agregados reciclados de RCC em camadas de pavimentação, segundo a NBR 15115 (ABNT, 2004).

Ensaio	Detalhamento	
Análise granulométrica	dimensão característica máxima	63,5 mm
	coeficiente de uniformidade	≥ 10
	coeficiente de curvatura	não consta
	% passante na peneira 0,42mm	10% ≤ a ≤ 40%
Teor de material indesejável	mesmA natureza	máximo 2,0%
	naturezas distintas	máximo 3,0%
Forma dos grãos	% dos grãos lamelares	máximo 30%
Índice de suporte Califórnia	de acordo com o tipo de camada	Base: ≥ 60%
		Sub-base: ≥ 20%
		Reforço do subleito: ≥ 12%
Expansão	de acordo com o tipo de camada	Base: máximo 0,5%
		Sub-base: ≤ 1,0%
		Reforço do subleito: ≤ 1,0%

Neste item serão abordadas as propriedades de caracterização física dos agregados reciclados de RCC, tais como, composição gravimétrica, teor de materiais indesejáveis, massa específica das partículas, absorção de água, granulometria, forma dos grãos, compactação e, neste último caso, sua influência na granulometria e na forma dos grãos.

2.5.1 Propriedades físicas

2.5.1.1 Composição gravimétrica

Carneiro (2005) analisou o RCC gerado na Região Metropolitana do Recife - PE e verificou que 91% do Resíduo da Construção Civil era passível de ser reciclado, conforme Tabela 2.2, que também inclui outras pesquisas realizadas sobre a composição dos constituintes do RCC mostram os percentuais dos componentes.

Tabela 2.2 – Constituição gravimétrica de pesquisas realizadas aplicando agregados reciclados de RCC.

Pesquisa	Aplicação	Composição (%)						
		Concreto	Argamassa	Cerâmicos	Rochas	Solo	Mat. Indesej.	Miúdos
Zordan (1997)	Concreto	21,0	36,0	21,0	18,0	-	3,0	1,0
Leite (2001)	Concreto	28,3	15,2	26,3	29,8	-	-	0,4
Vieira e Molin (2004)	Concreto	19,0	28,0	48,0	-	-	3,0	2,0
Motta (2005)	Pavimentação	41,9		4,3	23,8	-	3,7	26,5
Carneiro (2005)	Reciclagem	-	24,0	17,0	6,0	23,0	9,0	-
Morais (2006)	Diagnóstico deposição	38,0	22,0	1,0	-	-	37,4	2,0
Hood (2006)	Pavimentação	26,6	38,4	29,1	5,9	-	-	-
Leite (2007)	Pavimentação	55,3		15,9	11,8	-	13,5	3,5
Nóbrega e Melo (2009)	Pavimentação	42,3		38,4	11,5	-	7,0	0,8
Silva (2009)	Pavimentação	20,9	44,0	8,7	23,6	-	2,0	1,2
Lira Jr. (2010)	Reforço de solo	61,0	17,0	11,0	-	-	5,0	6,0
Rodrigues (2011)	Concreto	69,0	28,0		-	-	-	3,0

A Tabela 2.2 indica que a composição gravimétrica dos RCC apresenta em sua maioria constituintes que podem ser aplicáveis como agregados reciclados sendo a maior parcela de materiais cimentícios (concreto e argamassa) e cerâmicos (telhas e tijolos), dependendo da fase da obra em que foi coletado o resíduo. O uso do RCC como agregado na construção civil depende de estudos de suas propriedades, já que se trata de um material bastante heterogêneo, como verificado nas pesquisas consultadas.

2.5.1.2 Teor de materiais indesejáveis

A NBR 15115 (ABNT, 2004) estabelece limite na quantidade de materiais indesejáveis (pertencentes aos constituintes das classes B, C e D da Resolução CONAMA nº 307 de 2002), sendo em percentual de massa: por natureza 2% e no total 3%. Algumas pesquisas consultadas, utilizando RCC como agregado reciclado na construção civil, apresentaram os seguintes valores para este parâmetro, que ficou abaixo do limite estabelecido na NBR 15115 (ABNT, 2004), conforme indicado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Porcentagem de teor de material indesejável em pesquisas para uso de RCC.

Teor de material indesejável (%)	Fonte
1,2	Silva (2009)
0,8	Nóbrega e Melo (2009)
2,0	Macedo (2008)
1,6	Leite (2007)
0,3	Motta (2005)
2,0	Vieira & Molin (2004)
0,4	Leite (2001)
1,0	Zordan (1997)

2.5.1.3 Massa específica das partículas

De acordo com Leite (2001) a massa específica das partículas de agregado reciclado é normalmente inferior ao agregado natural, devido à presença de restos de materiais aderidos. A Tabela 2.4 mostra uma comparação de valores de massa específica para ambos agregados (natural e reciclado) de algumas pesquisas da literatura.

Tabela 2.4 – Massa específica de agregados reciclado e natural.

Parâmetro	Massa específica (kg/dm³)				Fonte
Agregado	Graúdo		Miúdo		
Material	natural	reciclado	natural	reciclado	
Valores	2.700	--	2.620	2.540	Rodrigues (2011)
	2.730	2.520	2.620	2.510	Vieira (2003)
	3.090	2.510	2.632	2.529	Leite (2001)

Carneiro (2005) avaliou que valores de massa específica para os agregados reciclados são cerca 35% menores que os naturais, enquanto Silva *et al*. (2008) obtiveram aproximadamente diferença de 14% inferiores. No caso de Leite (2007) os valores foram cerca de 4% inferiores, já Barbosa (2009) observou valores até 22% inferiores em relação ao agregado natural. É notado, portanto, que a variabilidade dos valores encontrados influencia na massa específica das partículas. A Tabela 2.5 mostra valores de massa específica de agregados reciclados de RCC de outras pesquisas.

Tabela 2.5 – Massas específicas de agregados reciclados em diferentes pesquisas.

Origem	Granulometria	Massa específica (kg/m³)	Local	Fonte
RCC	graúda	2.650	Recife - PE	Silva (2009)
RCC	miúda	2.390	Juazeiro-BA	Barbosa (2009)
RCC - Estrutura	miúda	2.690	Recife-PE	Medeiros Jr. (2008)
RCC - Alvenaria		2.640		
RCC - Acabamento		2.640		
RCC - Estrutura	miúda	2.690	Recife-PE	Macedo (2008)
RCC - Alvenaria		2.640		
RCC - Acabamento		2.640		
RCC - Demolição		2.630		
RCC	graúda	2.690	Santo André - SP	Leite (2007)
	miúda	2.740		
		2.750		
RCC	miúdo	2.366	Porto Alegre - RS	Hood (2006)
RCC	graúda - cerâmica	1.500 a 2.100	Itaquera-SP	Angulo (2005)
	graúda - cimentícia	1.600 a 2.600		
RCC	graúda	2.350	Ancona (Itália)	Sani *et al.* (2005)
	miúda	2.280		
RCC	graúda	2.020	Recife - PE	Carneiro (2005)
	miúda	2.340		
telhas cerâmicas	graúda	1.810	Monte Carlo - MG	Dias (2004)
RCC	graúda	2.390	Austrália	Crentisil *et al.* (2001)
RCC	graúda	1.090	Campinas - SP	Zordan (1997)
	miúda	1.410		

2.5.1.4 Absorção de água

A absorção de água dos agregados reciclados é uma das características que mais diverge em relação aos agregados naturais. A alta porosidade, devido a presença de argamassas e materiais cerâmicos, à composição do resíduo, a grande quantidade de material miúdo, dentre outros, influenciam neste parâmetro (LIMA, 1999; ZORDAN, 1997; ANGULO, 2000; MIRANDA, 2000; BUTTLER, 2003).

O teor de absorção é variável entre agregados, visto que depende do diâmetro do material, como observado nos materiais miúdos, que por exemplo, na pesquisa de Ulsen (2006) tiveram uma variação de 3,6 a 18,3%, enquanto os graúdos apresentaram cerca de 10%.

Um fator importante observado no agregado reciclado de resíduo da construção civil é sua alta porosidade em relação aos agregados comuns (CARNEIRO *et al.*, 2001). O ensaio de absorção é indicado para avaliar a capacidade do agregado em absorver água. Segundo Frazão (2002), a

capacidade de absorção elevada indica a alta porosidade do material, e por consequência implica em baixa resistência mecânica, o que mostra a possibilidade da influência da absorção em outras propriedades do agregado.

A Tabela 2.6 mostra valores médios do teor de absorção de RCC bruto de diferentes pesquisas. Esta Tabela mostra que as amostras originais apresentam variabilidade no teor de absorção entre as pesquisas o que deve ser influência da composição dos agregados reciclado de RCC, além de resumir os resultados de diversas pesquisas nas quais as amostras por constituintes apresentam os materiais cerâmicos como os que possuem maior capacidade de absorção. Assim sendo, este parâmetro não influencia muito na compactação do material, visto que trata-se de um material granular a ser utilizado em bases e sub-bases.

Tabela 2.6 – Teor de absorção das amostras originais do RCC em várias pesquisas.

Constituição do material	**Absorção (%)**	**Fonte**
brita 1 (diâmetro > 9,5mm)	8,1	Silva (2009)
brita 0 (diâmetro > 4,8mm)	9,6	
concreto	4,6	Gruba (2009)
	4,5	
cimentícios	11,5	Leite (2007)
britas	3,8	
Telhas/tijolos	20,7	
Pisos/azulejos	11,1	
concreto	7,6	Cabral (2007)
argamassa	4,1	
cerâmica vermelha	10,7	
cerâmico	19,0	Poon e Chan (2006) *apud* Leite (2007)
cerâmica vermelha	8,7 a 32,4	Angulo (2005)
cimentícia	2,2 a 20,1	
GR1 (Agregado de concreto)	5,5	Butler (2003)
GR7 (Agregado de concreto)	6,4	
GR28 (Agregado de concreto)	6,2	
GRNA28 (Agregado de concreto não-adensado)	6,3	
argamassa/concreto/blocos de concreto	3 a 8	(I&T, 1990 *apud* Lima, 1999)
argamassa/material cerâmico	6 a 11	
argamassa/tijolo cerâmico maciço	12 a 18	
misto	11,3	Leite e Lima (2009)
misto	12,2	Leite (2007)
misto	7,8	Motta (2005)
misto	6,0	Vieira *et al.* (2004)
misto	8,2	Carneiro *et al.* (2004)
cerâmico	17,5	Fonseca (2006)
misto	3 a 8	(I&T, 1990 *apud* Lima, 1999)
misto	6 a 11	
misto	12 a 18	

2.5.1.5 Granulometria

A distribuição granulométrica do agregado é uma das características que influenciam na estabilidade do pavimento, pois a variabilidade de tamanho das partículas, ou seja, interação entre grãos graúdos e miúdos causa maior atrito interno (DNER, 2006).

A granulometria dos agregados reciclados pode ser influenciada por vários fatores, como, por exemplo, o procedimento de produção, as características da granulometria original e a natureza de constituição do material, ou seja, esse parâmetro depende de cada resíduo reciclado (LIMA, 1999).

A NBR 15115 (ABNT, 2004) determina que o diâmetro máximo do agregado reciclado de RCC para uso em camadas de pavimentação deve ser 63,5 mm, além de ter um limite para o coeficiente de uniformidade (C_u), conforme indicado na Tabela 2.1.

Carneiro (2005) analisou amostras de RCC de 04 (quatro) amostras de fases diferentes da construção civil (fundação, estrutura, alvenaria e acabamento), na cidade de Recife - PE, e constatou que a fase de fundação teve a melhor distribuição granulométrica, devido sua maior heterogeneidade, portanto, a granulometria é influenciada pela origem dos agregados reciclados (Figura 2.2).

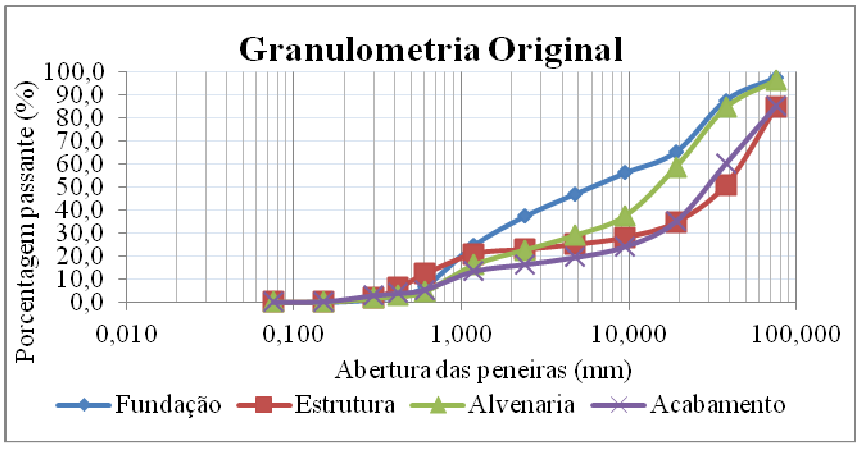

Figura 2.2 – Granulometria do agregado reciclado de RCC em cada fase de obra (CARNEIRO, 2005).

Na cidade de São Paulo-SP, Motta (2005) constatou que a amostra de agregado reciclado, com diâmetro máximo de 50,80 mm e da fase de estrutura, possuía uma granulometria bem graduada. O percentual retido na peneira 0,42 mm foi cerca de 10% e o coeficiente de uniformidade 42, ou seja, não era uniforme, atendendo às especificações da NBR 15115 (ABNT, 2004).

Ulsen (2006) em pesquisa realizada nas cidades de Itaquera e Vinhedo, ambas do Estado de São Paulo, com agregado reciclado de RCC de diâmetro máximo de 50,80 mm, as frações granulométricas com diâmetro maior que 25,4 mm ficaram cerca de 20% para a amostra de Itaquera de resíduos cinzas (cimentíceos) e vermelha (cerâmicos) e 45% para a amostra de Vinhedo para o resíduo vermelho. Outra observação da pesquisada foi que a amostra cimentícia (Itaquera cinza) passante na peneira 4,8 mm ficou em torno de 40% e da cerâmica (vermelha) entre 25 e 30%. A Figura 2.3 apresenta a distribuição granulométrica das amostras analisadas, com uma granulometria heterogênea dos grãos, segundo Ulsen (2006).

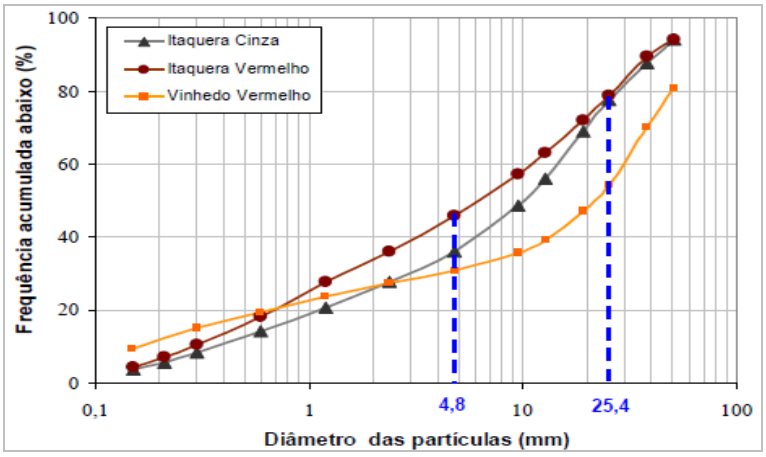

Figura 2.3 – Granulometria do agregado reciclado da amostra analisada (ULSEN, 2006).

Leite (2007) apresentou amostra coletada do agregado reciclado de Santo André – SP, as partículas diâmetro inferior a 50,0 mm, que atendeu à norma ETS-001 (PMSP, 2003) da Prefeitura Municipal de São Paulo/SP (PMSP), Figura 2.4. Os outros valores, percentual retido na peneira 0,42 mm foi 21,2% e o coeficiente de uniformidade foi 53, atenderam às normas NBR 15115 (ABNT, 2004) e ETS-001 (PMSP, 2003). Contudo, o coeficiente de curvatura (0,3) não atendeu à norma da PMSP, porém, para a NBR 15115 não existe limite para este parâmetro,

portanto segundo a NBR 15115 (ABNT, 2004) a amostra de Leite (2007) foi considerada uniforme.

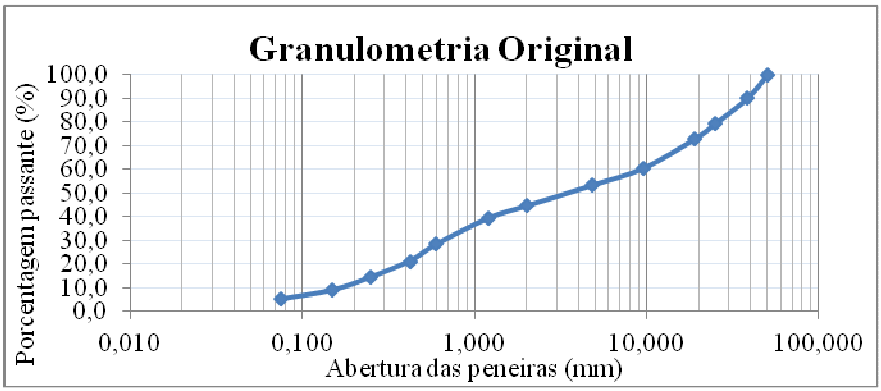

Figura 2.4 – Granulometria original do agregado reciclado de RCC da amostra analisada por Leite (2007).

Os critérios da norma da ETS-001 (PMSP, 2003) são mostrados na Tabela 2.7. Vê-se que, comparando com os parâmetros da NBR 15115 (ABNT, 2004) apresentados na Tabela 2.1º diâmetro da norma Paulista estipula diâmetro máximo inferior ao da norma brasileira (63,5 mm), além de reduzir o intervalo do percentual passante na peneira 0,42 mm, estabelecendo como limite superior o valor de 30, menor que o apresentado na norma da ABNT. Portanto, observa-se que a norma da ETS-001 (PMSP, 2003) é mais restritiva.

Tabela 2.7 – Aspectos e limites fixados pela norma do Município de São Paulo com relação à granulometria

Dimensão máxima dos grãos (mm)	**Porcentagem passante na # 0,42 mm (%)**	**Cu**	**Cc**	**Fonte**
50,0	$10 \leq a \leq 30$	≥ 10	$1 \leq a \leq 3$	PMSP/SP ETS-001 (PMSP, 2003)

Em 2009, na cidade de São Carlos-SP, Grubba utilizou amostras de agregado reciclado de concreto (ARC) e ARC-solo (misto), com diâmetro máximo de 19,00 mm. O autor observou que as variações granulométricas, ocasionada pela aplicação das energias de compactação intermediária e modificada, constituiu um acréscimo médio do material passante de 2,8% em cada peneira, além de ser constatado que na peneira 0,42 mm ficou em torno de 24% atendendo a NBR 15115 (ABNT, 2004).

Lira Jr. (2010), na cidade de Recife - PE, utilizou amostras das fases de estrutura, alvenaria, acabamento e demolição, com diâmetro máximo de 4,8 mm. Foi constatado que o resíduo era constituído, praticamente, de areia (88,65%), além de ter uma pequena fração de silte (6,86%) e argila (0,66%). Os coeficientes de uniformidade (Cu) e de curvatura (Cc) apresentaram valores acima de 10,00 e de 1,00, respectivamente.

Percebe-se que a variabilidade da granulometria dos agregados reciclados de RCC depende de algumas características tais como: composição granulométrica e sistema construtivo.

2.5.1.6 Índice de forma

A forma do agregado reciclado depende de alguns fatores como, por exemplo, composição do RCC, equipamentos usados no processo de beneficiamento, que podem ocasionar em presença de material com forma mais lamelar, além de textura mais áspera em relação aos agregados naturais (LIMA, 1999).

A NBR 15115 (ABNT, 2004) estabelece limites em algumas formas para aplicação do agregado reciclado em pavimentação, ou seja, a presença no máximo de 30% de grãos lamelares (que possuem razão entre largura e comprimento maior que 0,5 e entre altura e largura inferior a 0,5), além de exigir em sua maior parcela grãos na forma cúbica.

Leite (2007) analisou a forma de agregados reciclados de RCC, com diâmetro máximo de 50,0 mm para aplicação numa via de baixo volume de tráfego na Universidade de São Paulo (USP Leste), e obteve os seguintes valores como resultado: cúbica (55%), alongada (5,5%), alongada-lamelar (percentual nulo) e lamelar (38,8%). Este material, antes do processo de compactação, não poderia ter sua aplicação como material de camadas de pavimentos, contudo o autor constatou que após a compactação, os resultados apresentaram-se de acordo com a norma.

2.5.1.7 Compactação

A importância da compactação na camada de pavimentação é devido ao aumento da densidade do material constituinte (com a diminuição dos vazios, ou seja, volume). Assim, o ganho de resistência ao cisalhamento e a redução da deformação devido ao maior contato entre os grãos amplia a estabilidade do pavimento (PINTO, 2000; DNIT, 2006; LEITE, 2007).

No ensaio de compactação, a intensidade das energias utilizadas é crescente e são classificadas como: normal, intermediária e modificada. Conforme a NBR 15115 (ABNT, 2004), a energia mínima aplicada na compactação de agregados reciclados de resíduos da construção civil em bases deve ser a intermediária. Estas energias influenciam na umidade ótima, que diminui com o incremento de energia, entretanto o valor do peso específico aparente seco máximo aumenta.

A Tabela 2.8 apresenta um resumo dos valores de peso específico seco máximo e teor de umidade ótima obtidos em ensaios de compactação realizados em agregados reciclados de RCC em diferentes pesquisas da literatura. Os valores são variáveis indicando a heterogeneidade que os resíduos apresentam de acordo com sua composição, granulometria e resistência aos golpes.

Esta Tabela mostra que os valores do peso específico seco máximo e teor de umidade ótima identificados em pesquisas realizadas ficaram, na energia intermediária entre, respectivamente, 17,3 e 18,3 kN/m³; e 13,8 e 14,3%, respectivamente já na aplicação da energia modificada os valores variaram entre 17,8 e 20,3 kN/m³; e 12,5 a 21,2%, respectivamente para $P_{wmáx}$ e h_{ot}. Portanto, é mostrado que, exceto por uma amostra de Gubba (2009), os resultados são influenciados pela intensidade da energia aplicada no ensaio, pois o peso específico é inferior para energia intermediária que a modificada, além do que os pesos específicos são inversamente proporcional às umidades ótimas, como era esperado.

Tabela 2.8 – Valores dos parâmetros de compactação para agregados reciclados em pesquisas realizadas.

Local	Composição	Energia aplicada	Diâmetro máximo das partículas (mm)	Peso específico aparente seco máximo (kN/m³)	Umidade ótima (%)	Fonte
Rio de Janeiro-RJ	Misto	Intermediária	19,0	18,3	13,8	Fernandes (2004)
		Modificada		18,5	12,5	
São Paulo - SP	Misto	Intermediária	50,0	18,3	11,0	Motta (2005)
Santo André - SP	Misto	Intermediária	50,0	17,6	14,6	Leite (2007)
		Modificada		18,2	13,5	
São Carlos - SP	Misto	Normal	60,0	18,2	16,2	Santos (2007)
				17,9	17,8	
				18,5	14,2	
				18,7	13,6	
				18,9	13,0	
Recife - PE	Estrutura	Normal	4,8	17,5	14,0	Macedo (2008)
	Alvenaria			16,4	21,0	
	Acabamento			16,3	14,0	
	Demolição			15,7	21,0	
São Carlos - SP	solo	Modificada	19,0	17,8	21,2	Grubba (2009)
	Concreto+solo			20,3	11,5	
	concreto			19,3	11,0	
Recife - PE	Estrutura	Normal	4,8	17,5	14,0	Silva (2009)
	Alvenaria			16,5	21,5	
	Acabamento			16,4	14,5	
	Demolição			15,8	21,5	
Recife - PE	Estrutura	Normal	4,8	17,5	13,8	Medeiros Jr. (2010)
	Alvenaria			16,5	21,6	
	Acabamento			16,4	14,4	
Recife - PE	Misto	Normal	4,8	15,8	17,5	Lira Jr. (2010)

- Influência da compactação

De acordo com Leite (2007), é importante analisar a resistência ao desgaste dos agregados que serão utilizados nas camadas do pavimento, para o funcionamento da estrutura do pavimento. Deve-se, também, ser analisada a granulometria e a forma das partículas após o processo de compactação.

- Granulometria

Motta (2005) analisou a influência da compactação, na granulometria, em diferentes teores de umidade e observou que, de maneira geral, a compactação causa uma variabilidade granulométrica considerável, como também, ressaltou que, com uma menor energia, a compactação ocasiona uma degradação de menor magnitude, conforme Figura 2.5.

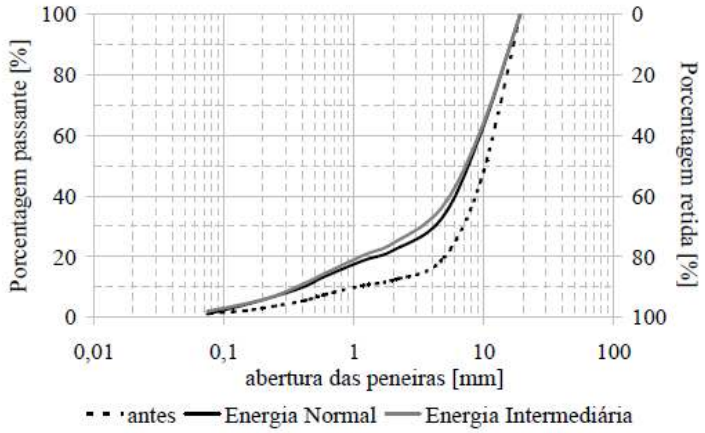

Figura 2.5 – Granulometria original e influenciada pela compactação do RCC (MOTTA, 2005).

No estudo de Leite (2007), no entanto ocorreram pequenas variações na granulometria após a compactação de agregados reciclados de RCC, conforme Figura 2.6. Portanto, a partir da variação granulométrica, indica a possibilidade de baixa degradação das partículas do pavimento e possíveis recalques do mesmo.

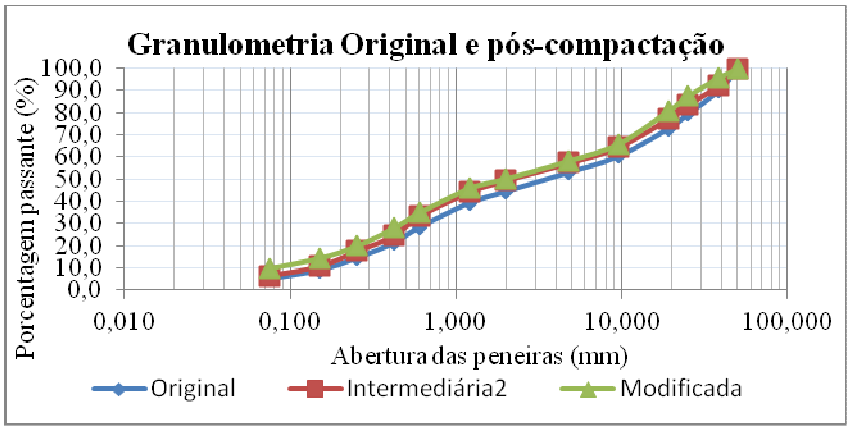

Figura 2.6 – Granulometria original e influenciada pela compactação do RCC (LEITE, 2007).

Santos (2007) averiguou que não houve muita variação da granulometria das amostras ensaiadas, do tipo brita corrida, após a compactação. Supôs que esta pouca variabilidade deveu-se ao fato de que a geração, transporte para o beneficiamento e transporte para armazenamento contribuíram para quebra inicial das partículas, que proporcionou resistência ao ser compactado.

Grubba (2009) verificou que a variação de granulometria após a compactação foi, aproximadamente, 2,8% em cada peneira, exceto na peneira número 40 (0,042 mm) que foi 5%. O autor notou que a degradação do agregado reciclado de concreto, em relação à granulometria, foi pouco expressiva devido à presença predominante de resíduos de concreto e materiais pétreos.

Lira Jr. (2010) constatou que nas amostras de RCC (fundação, estrutura, alvenaria e acabamento) não houve alteração expressiva da granulometria para as curvas granulométricas originais e pós-compactação na energia normal e, que na fase de estrutura as curvas quase se sobrepõem.

- Forma dos grãos

A compactação, assim como na granulometria, pode causar modificações na forma dos grãos. Leite (2007) constatou que houve um aumento das partículas cúbicas, assim como uma diminuição da forma lamelar, ficando abaixo dos 30%, estabelecido pela norma sobre o uso de agregados reciclados na pavimentação, NBR 15115 (ABNT, 2004). O autor também observou que a maior alteração da forma ocorreu nos primeiros golpes, visto que a diferença entre a aplicação da energia intermediária e modificada é mínima.

2.6 Pavimentação

2.6.1 Definições

O pavimento é definido como estrutura construída sobre terraplanagem que se destina a resistir aos esforços verticais do tráfego, distribuindo-os pelas camadas para o leito, melhorar as condições de rolamento e combater o desgaste (esforços horizontais) do tráfego (SENÇO, 1997).

Bernucci *et al*. (2006) afirmam que pavimento é uma estrutura utilizada para proporcionar conforto, economia e segurança aos usuários que transitam pelas vias, além de absorver parte dos esforços oriundos da carga do tráfego e transmitir o restante ao leito natural de maneira homogênea. Esta estrutura é composta por sistemas de camadas assentes sobre uma fundação chamada subleito.

De acordo com o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT, 2006) o pavimento é uma superestrutura formada, após a terraplanagem da via, por camadas de materiais de diferentes resistências e deformabilidade, de espessuras finitas, apoiadas no subleito, infra-estrutura ou fundação do pavimento. A pavimentação da via serve para melhorar as condições do rolamento, proporcionando conforto e segurança ao usuário. A seção transversal de um pavimento é apresentada na Figura 2.7.

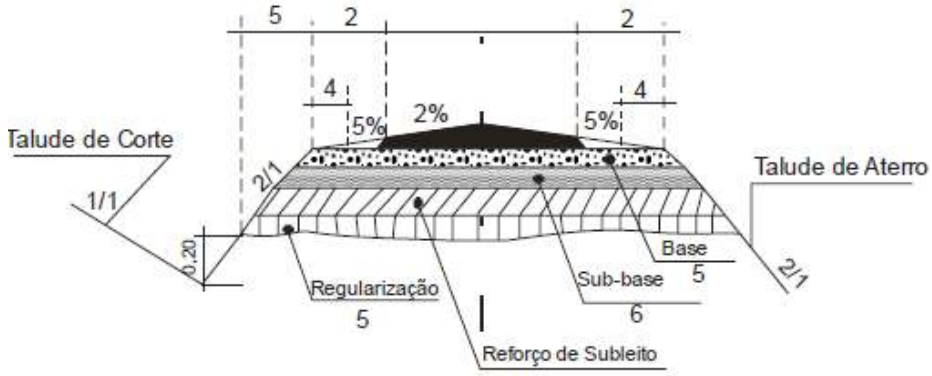

Figura 2.7 – Seção transversal do pavimento (DNIT, 2006).

As camadas do pavimento, apresentadas na Figura 2.8, segundo o DNIT (2006), são:

a) Subleito: terreno de fundação do pavimento;
b) Leito: Superfície originada após a terraplanagem, conformada pelo greide e perfis transversais;
c) Greide do leito: perfil longitudinal do leito;
d) Regularização: camada executada sobre o leito, que serve para conformá-lo seguindo especificações longitudinais e transversais de projeto;
e) Reforço de subleito: camada aplicada sobre o subleito utilizada para melhorar suas características e possui espessura constante;
f) Sub-base: camada de apoio da base;
g) Base: camada utilizada para receber e distribuir os esforços das tensões oriundas do tráfego sobre o revestimento;
h) Revestimento: camada que recebe, diretamente, a ação do tráfego. Deve ser impermeável e serve para dar comodidade e segurança aos usuários da via.

O pavimento é classificado como rígido e flexível, sendo o primeiro pouco deformável e constituído principalmente de concreto de cimento Portland (Figura 2.8).; já o segundo tipo é aquele em que deformações são aceitáveis até certo limite sem causar rompimento da estrutura (SENÇO, 1997; BERNUCCI *et al.,* 2006; DNIT, 2006; IME, 2008).

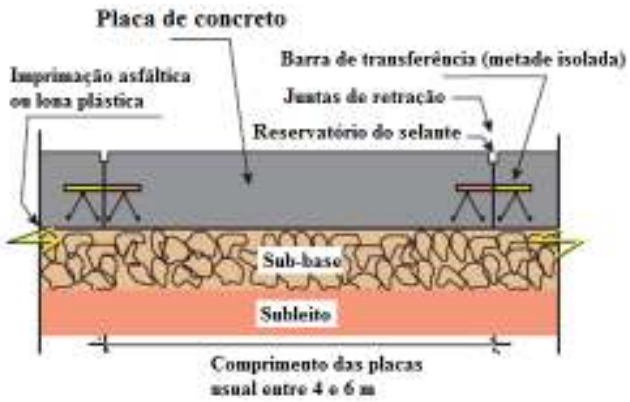

Figura 2.8 – Estruturas de pavimentos rígidos (BERNUCCI *et al*., 2006).

Conforme Bernucci *et al*. (2006), nesses pavimentos a espessura é determinada a partir da carga que solicitará a estrutura em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas inferiores. As placas de concreto podem ser armadas ou não, sendo apoiadas em uma sub-base de material granular ou de material estabilizado com cimento (por exemplo, Concreto Compactado com Rolo – CCR), além de poderem ser assentadas sobre o subleito ou um reforço do subleito, como mostra a Figura 2.9. No revestimento rígido, tais problemas podem ser causados por instabilidade da sub-base, camada de apoio das placas ou cargas que ultrapassam o valor máximo de solicitação (BERNUCCI *et al*., 2006).

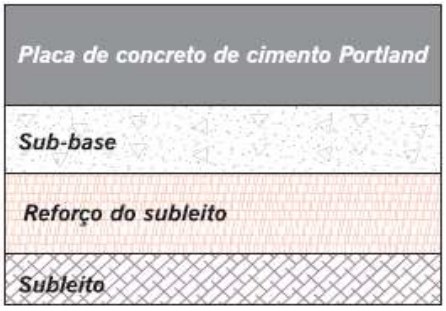

Figura 2.9 – Pavimento de concreto de cimento Portland - Estrutura de pavimento-tipo (BERNUCCI *et al*., 2006).

O Instituto Militar de Engenharia classificou, em 2008, pavimentos rígidos como aquele que o revestimento é feito com uma placa em concreto de cimento Portland, que podem ser armadas ou não, e tendem a distribuir a carga por uma área relativamente vasta da sub-base (Figura 2.10), onde a placa de concreto supre a maior parte da capacidade estrutural de um pavimento rígido e rompe na tração por flexão, quando são sujeitos a deformações.

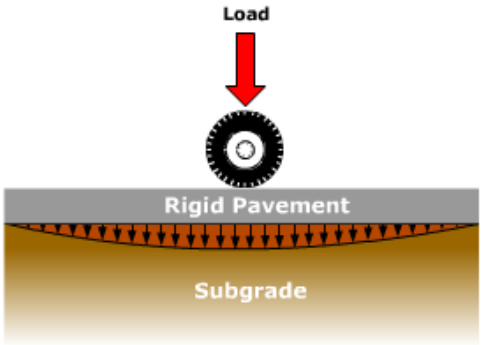

Figura 2.10 – Pavimento de concreto de cimento Portland - Estrutura de pavimento-tipo (IME, 2008).

Os pavimentos flexíveis ou asfálticos possuem um revestimento composto de uma mistura de agregados e ligantes asfálticos; o que constitui o concreto asfáltico (CA) ou concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ). É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, seguida de camada intermediária de ligação (*binder*); apoiado em sequência nas camadas de base, sub-base e reforço do subleito, que podem ser constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes, como mostra a Figura 2.11 (BERNUCCI *et al*., 2006).

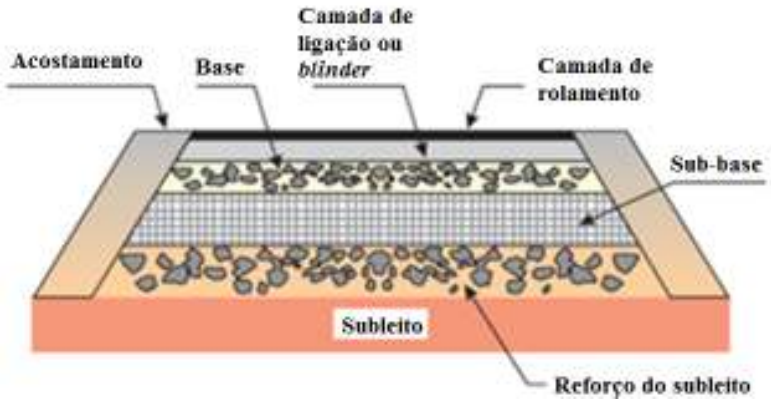

Figura 2.11 – Estruturas de pavimentos flexível (BERNUCCI et al., 2006).

A função do revestimento (camada mais externa) constituído por componentes asfálticos (Concreto Betuminoso Usinado à Quente –CBUQ), é combater as ações do tráfego e transmitir a carga por uma área menor para as camadas inferiores, além de impermeabilizar o pavimento, fornece conforto e segurança aos usuários. No revestimento flexível, as tensões e deformações impostas à camada asfáltica pelas cargas do tráfego podem causar o trincamento por fadiga do revestimento, conforme Figura 2.12 (IME, 2006). Ainda nos pavimentos flexíveis, as camadas subsequentes, ou seja, base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural, pois limitam as tensões e deformações na estrutura do pavimento causadas pela carga ocasionada pelo tráfego dos veículos (Figura 2.13). (BERNUCCI *et al*., 2006, DNER, 2006).

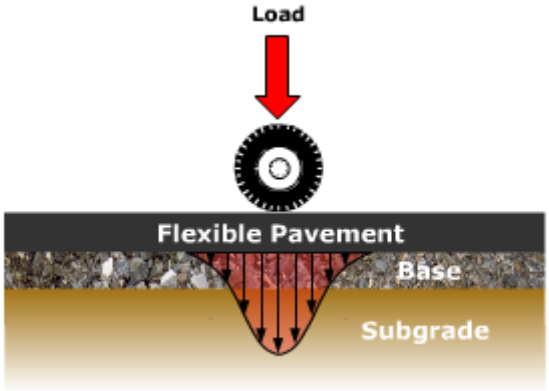

Figura 2.12 – Estruturas de pavimentos flexível (IME, 2006).

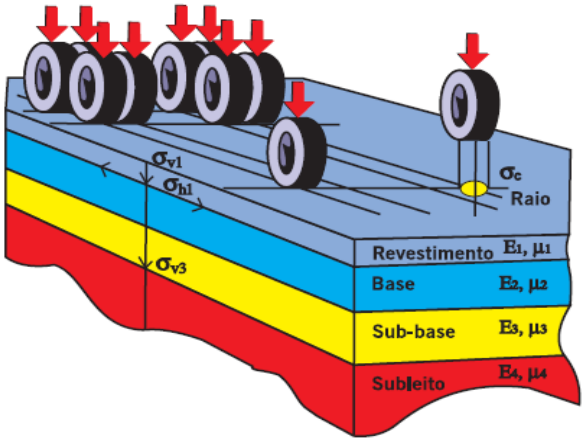

Figura 2.13 – Ilustração do sistema de camadas de um pavimento flexível e tensões solicitantes (ALBERNAZ, 1997 *apud* BERNUCCI *et al*., 2006).

2.6.2 Normas e propriedades dos materiais de camadas de pavimentos

Segundo Bernucci *et al*. (2006), para a seleção e caracterização dos materiais de base, sub-base e reforço do subleito é verificada a disponibilidade dos materiais em relação às características para o emprego em estruturas dos pavimentos. Os materiais utilizados, quando compactados para pavimentação tem que ser resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura.

O Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT) criou normas de especificações de serviço que norteiam a execução das etapas construtivas que avaliam as características dos materiais utilizados em obras de pavimentação, para verificar a possibilidade de utilizar os solos e agregados naturais disponíveis próximos das obras. Não existem, atualmente, normas de especificação de serviços do DNIT para execução utilizando agregados reciclados, contudo existem para agregados naturais com algumas adições, por exemplo, cimento e borracha, tais normas são:

- DNIT 031/2006- ES (*) - Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico;
- DNIT 032/2005- ES (*) - Pavimentos Flexíveis – Areia Asfalto a quente;
- DNIT 033/2005- ES (*) - Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico Reciclado a quente na usina;
- DNIT 034/2005- ES (*) - Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico Reciclado a quente no local;
- DNIT 035/2005- ES (*) - Pavimentos flexíveis – Micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero;
- DNIT 047/2004- ES - Pavimento Rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de pequeno porte;
- DNIT 048/2004- ES - Pavimento Rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-trilho;
- DNIT 049/2009- ES - Pavimento Rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-deslizante;

- DNIT 056/2004- ES - Pavimento Rígido - Sub-base de cimento de concreto Portland compactada com rolo;
- DNIT 057/2004- ES - Pavimento Rígido - Execução de sub-base melhorada com cimento;
- DNIT 058/2004- ES - Pavimento Rígido - Execução de sub-base de solo-cimento;
- DNIT 059/2004- ES - Pavimento Rígido - Pavimento de concreto de cimento Portland, compactado com rolo;
- DNIT 065/2004- ES - Pavimento Rígido - Sub-base de concreto de cimento Portland adensado por vibração;
- DNIT 066/2004- ES - Pavimento Rígido - Construção com peças pré-moldada de concreto de cimento Portland;
- DNIT 067/2004- ES - Pavimento Rígido - Reabilitação;
- DNIT 068/2004- ES - Pavimento Rígido - Execução de camada superposta de concreto do tipo Whitetopping por meio mecânico;
- DNIT 098/2007-ES - Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico;
- DNIT 112/2009-ES - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo "Terminal Blending";
- DNIT 114/2009-ES - Pavimentação rodoviária - Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA;
- DNIT 115/2009-ES - Pavimentação rodoviária - Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA;
- DNIT 137/2010-ES: Pavimentação – Regularização do subleito;
- DNIT 138/2010-ES: Pavimentação – Reforço do subleito;
- DNIT 139/2010-ES: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente;
- DNIT 140/2010-ES: Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento;
- DNIT 141/2010-ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - ERRATA;
- DNIT 142/2010-ES: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento;
- DNIT 143/2010-ES: Pavimentação – Base de solo-cimento;
- DNIT 144/2010-ES: Pavimentação asfáltica – Imprimação com ligante asfáltico convencional;

- DNIT 145/2010-ES: Pavimentação – Pintura de ligação com ligante asfáltico convencional;
- DNIT 146/2010-ES: Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Simples com ligante asfáltico convencional;
- DNIT 147/2010-ES: Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Duplo com ligante asfáltico convencional;
- DNIT 148/2010-ES: Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Triplo com ligante asfáltico convencional;
- DNIT 149/2010-ES: Pavimentação asfáltica – Macadame betuminoso com ligante asfáltico convencional por penetração;
- DNIT 150/2010-ES: Pavimentação asfáltica – Lama asfáltica;
- DNIT 151/2010-ES: Pavimentação – Acostamentos;
- DNIT 152/2010-ES: Pavimentação – Macadame hidráulico;
- DNIT 153/2010-ES: Pavimentação asfáltica – Pré- misturado a frio com emulsão catiônica convencional;
- DNIT 154/2010-ES – Pavimentação asfáltica – Recuperação de defeitos em pavimentos asfálticos;
- DNIT 159/2011-ES – Pavimentos asfálticos - Fresagem a frio.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui normas de ensaios de solos e de agregados naturais, e que vem sendo utilizadas, também, para agregados reciclados devido à inexistência de normas específicas. A seguir algumas das normas da ABNT úteis para o estudo de pavimentação:

- NBR 6457/86 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 6458/84 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água;
- NBR 6508/84 – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica;
- NBR 6954/89 – Lastro Padrão: Determinação da forma do material;
- NBR 7181/84 – Solo – Análise granulométrica – Método de ensaio;

- NBR 7182/86 – Solo – Ensaio de compactação;
- NBR 9895/87 – Solo - Índice de suporte Califórnia - Método de ensaio;
- NBR 15087/04 – Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral;
- NBR 15115/04 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.

2.6.3 Propriedades mecânicas dos materiais de base, sub-base e reforço do subleito

No dimensionamento de camada de pavimentos, são utilizados no Brasil dois parâmetros de caracterização das propriedades mecânicas: (i) Índice de Suporte Califórnia (ISC), usado no dimensionamento convencional do DNER (BERNUCCI *et al*., 2006) e (ii) Módulo de Resiliência - MR (BERNUCCI *et al*,. 2006).

2.6.3.1 Índice de Suporte Califórnia (California Bearing Ratio)

A utilização do índice de suporte Califórnia (ISC), expresso em percentual, em inglês California Bearing Ratio (CBR), é muito usual no meio rodoviário, pois este índice é usado no dimensionamento dos pavimentos. O objetivo principal consiste em auxiliar na avaliação da resistência estática da camadas, a partir do valor de suporte dos materiais granulares empregados em pavimentação, contudo verifica apenas as situações estáticas.

O ISC determina a capacidade do solo e/ou materiais utilizados em camadas de pavimentação em suportar cargas aplicadas sobre os mesmos. A determinação do ISC é obtida a partir da relação entre a pressão de penetração de um pistão num corpo de prova pela pressão num material granular de referência (DNIT, 2006).

A NBR 15115 (ABNT, 2004), aplicada para resíduos da construção civil para o uso de agregado reciclado de RCC em obras de pavimentação, utiliza o ISC como parâmetro que apresenta valor limite em função de cada camada do pavimento: base, sub-base e reforço de subleito. Um outro parâmetro também considerado para a análise do agregado reciclado é a expansão (Tabela 2.9).

Tabela 2.9 – Valores mínimos de ISC e máximos de expansão recomendados para emprego de agregado reciclado de RCC em camadas de pavimentos.

Norma / Especificação	Parâmetro	Base	Sub-base	Reforço de subleito
NBR, 15115 (ABNT, 2004)	ISC (%)	≥ 60 [(a)]	≥ 20	≥ 12
	Expansão (%)	$\leq 0,5$	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$

[(a)] É permitido o uso de agregado reciclado em camada de base para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo-padrão de 80kN no período do projeto.

Segundo Bernucci *et al*. (2006), a determinação do ISC auxilia na análise de deslocamentos significativos das camadas de reforço de subleito, subleito, sub-base e base; e verifica a potencialidade de ruptura, por meio de ensaio penetrométrico em laboratório, que corresponde a cargas estáticas, com intensidades crescentes, que causa grandes deslocamentos. Os materiais granulares de camadas de pavimentos são selecionados a partir de seu desempenho, através da resistência à penetração no ensaio ISC do material utilizado e, então, faz uma comparação com um "material padrão", para servir de valor de referência, equivalente a 100%. Contudo, podem-se encontrar valores de ISC acima de 100%.

A resistência no ensaio ISC é referente, indiretamente, à relação da coesão com o ângulo de atrito do solo, sendo a relação entre a pressão produzida pela penetração de um pistão num corpo de prova de solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial.

Outro parâmetro que pode ser analisado na execução do ensaio de ISC é a expansibilidade do material a ser aplicado em camadas de pavimentos e possibilita a busca de alternativas que visem a melhora desta condição de material que pode provocar irregularidade do pavimento.

2.6.3.2 Módulo de resiliência

O resultado do ensaio ISC não equivale ao efeito real nas estruturas do pavimento causado pelos veículos, pois esses transmitem cargas instantâneas e repetidas sobre os materiais da estrutura do

pavimento. Outro fator importante é que solos, com ISC semelhantes, podem ter comportamentos diferentes sob ação de cargas repetidas (SEED *et al*., 1955 *apud* BERNUCCI *et al*., 2006).

Segundo o DNIT (2006), o ensaio de módulo de resiliência é do tipo não-destrutivo, pois as cargas aplicadas são pequenas. O módulo de resiliência (MR) foi elaborado para medir deslocamentos e recuperações verticais, que possuem uma parcela permanente e uma resiliente (recuperável), causados por cargas de passagem rápidas das rodas. A medida do MR em laboratório é realizada por um equipamento que mede as cargas triaxiais dinâmicas. A versão atual é baseada no equipamento criado por Seed e Fead, na década de 1950 (BERNUCCI *et al*., 2006). O tipo e a duração do carregamento utilizado em um ensaio de cargas repetidas devem simular o que ocorre no campo (HUANG, 2004).

A determinação do MR é feita a partir de repetição de cargas triaxiais num corpo de prova com as seguintes características: 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para solos, solo-cimento e misturas de solo com agregado e, dependo da dimensão dos agregados graúdos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O ensaio inicia-se com uma compactação nas condições do projeto e obra do material.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), o cálculo do Módulo de resiliência é realizado pela razão entre a tensão desvio (σ_d) – em MPa, o qual é a diferença das tensões principal maior (σ_1) e a principal menor (tensão de confinamento) – ($\sigma_1 - \sigma_3$), pela deformação específica axial (ε_a), em mm/mm, sendo o $\varepsilon_a = d_r$ /L, com d_r = deslocamento recuperável e L= altura ou espessura (L) do corpo de prova. Portanto, o módulo de resiliência é dado pela expressão $MR = \sigma_d / \varepsilon_a$.

Valores de pesquisas realizadas observaram valores aceitáveis como Motta (2005) observou que o resultado do módulo de resiliência para agregado reciclado, após 90 dias de cura ficou entre 200 e 400 MPa, já Leite (2007) seus valores ficaram entre 182 e 385 MPa, na energia intermediária, e 223 e 442 MPa, para energia modificada.

2.6.3.3 Deformação permanente

A deformação permanente é um parâmetro importante para pavimentos flexíveis, visto que o dimensionamento deve impedir ou reduzir a existência de deformação permanente na estrutura. Tais situações são verificadas em afundamentos do pavimento de trilha-de-roda e em áreas de estacionamentos com revestimentos asfálticos (MEDINA, 1997; WERKMEISTER *et al*., 2001; HUANG, 2004; LEITE, 2007). Portanto, deve-se garantir a resistência de bases e sub-bases de pavimentos asfálticos, para prolongar sua vida útil.

Para a determinação permanente de materiais granulares são utilizados ensaios triaxiais de cargas repetidas, os quais são avaliados o número de solicitações de carregamento e a deformação permanente de maneira acumulada (BENNERT *et al*. 2000; HUANG, 2004; LEITE, 2007).

Leite (2007) utilizou o modelo proposto por Monismith *et al.* (1975) para determinar a deformação permanente, cuja equação é o modelo proposto por, que é $\varepsilon_p = a.N^b$, onde ε_p é a deformação permanente (10-3mm/mm), a é a deformação permanente após o primeiro ciclo, em (10-3mm/mm), N (número de ciclos) e b a inclinação da reta obtida por regressão.

Em pesquisa de Leite (2007) o agregado reciclado compactado na energia intermediária teve como resultado aos 100.000 ciclos uma deformação permanente de 3,98x10-3 mm/mm, enquanto na energia modificada teve uma deformação permanente de 3,60x10-3 mm/mm. Outra observação do autor foi a compactação bem executada representa uma maior resistência à deformação permanente.

Silva (2009) realizou uma pesquisa agregados reciclados de RCC em misturas asfálticas e observou que naquelas que utilizaram um ligantes mais resistente, como o CAP 50/70 a deformação final aos 20.000 ciclos foi 16,8% na faixa C e 21,75 para a faixa B com o mesmo ligante aos 4.600 ciclos, portanto esta mistura foi considerada apta para vias de baixo volume de tráfego.

Guimarães (2009) analisou a deformação permanente em solos constituintes de pavimentos e constatou que utilizando estado de tensões baixo e umidade ótima de compactação a deformação permanente acumulada foi usualmente inferior a 0,5 mm. Contudo, ao aumentar o estado de tensões dos ensaios a deformação permanente acumulada, em alguns materiais , como a areia argilosa do ES, que superou os 10 mm de deformação acumulada, que possibilitaria o afundamento de trilha-de-roda.

2.6.3.4 Outros ensaios mecânicos

Além dos ensaios de ISC e MR, existem outros ensaios para caracterizar o comportamento mecânico, como ensaios de resistência à tração por compressão diametral e a resistência por compressão simples, são apresentados brevemente.

- Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral tem por objetivo determinar a tensão máxima que um corpo de prova pode ser submetido, no sentido diametral, até que este seja rompido à tração, simulando para a estrutura do pavimento a situação de tração a flexão.

Motta (2005) realizou em diferentes tempos de cura e com adição de aglomerantes como cimento ou cal, e verificou que os corpos de prova deveriam resistir à flexão após uma aplicação de tensão diametral, ou seja, deve possuir coesão. A Foto 2.2 ilustra a execução do ensaio RTCD de uma amostra de agregado reciclado de RCC.

Foto 2.2 – Corpo de prova rompido em ensaio de resistência à tração por compressão diametral (MOTTA, 2005).

Os resultados obtidos por Motta (2005) apresentaram uma elevação em relação aos valores iniciais (0,1 a 0,3 MPa) na resistência ao adicionar aglomerantes, com adição de 4% de cal o valores ficaram entre 0,6 a 0,27 MPa, para aqueles com adição de 4% de cimento os valores foram entre 0,29 e 0,45 MPa.

A execução do ensaio para RCC pode ser baseada na especificação da norma NBR 15087 (ABNT, 2004) para mistura asfálticas, pois não existe norma específica para agregados reciclados.

- Resistência à compressão simples (RCS)

Este ensaio também é definido para materiais adicionados com aglomerantes cimentícios e em pavimentação é utilizado em solo-cimento ou brita graduada tratada com solo-cimento (BGTC).
A realização deste ensaio é feita a partir da aplicação de um carregamento crescente de compressão axial, em corpos de prova de altura maior ou igual ao dobro do diâmetro. O objetivo deste ensaio é verificar o máximo de tensão axial que o corpo suporta antes de romper. A Foto 2.3 ilustra a execução do ensaio de resistência por compressão simples.

O ensaio para RCC pode ser baseado na especificação da norma DNER ME-201 (1994) para solo-cimento, pois não existe norma específica para agregados reciclados.

Foto 2.3 – Execução de ensaio de resistência por compressão simples (MOTTA, 2005).

Os resultados obtidos por Motta (2005) apresentaram uma elevação em relação aos valores iniciais (0,13 a 0,66 MPa) na resistência ao adicionar aglomerantes, com adição de 4% de cal o valores ficaram entre 1,13 a 3,88 MPa, para aqueles com adição de 4% de cimento os valores foram entre 2,56 e 5,73 MPa.

2.6.4 Pesquisas realizadas sobre aplicações de ISC em Agregados Reciclados de RCC

A Tabela 2.10 apresenta valores de ISC e expansão de pesquisas sobre o uso de agregados reciclados de RCC em obras de pavimentação, em alguns caso como em Leite (2007). Os resultados são favoráveis para aplicação em todas as camadas de pavimentação (reforço do subleito, sub-base e base) em vias de baixo volume de tráfego, pois atendem à especificação da NBR 15115 (ABNT, 2004), exceto a pesquisa de Nóbrega e Melo (2009), que atendeu para sub-base e reforço de subleito.

Tabela 2.10 – Valores de ISC e expansão de pesquisas utilizando agregados graúdos reciclados de RCC.

Composição	Aplicação	Local	Energia aplicada	Diâmetro máximo das partículas (mm)	ISC (%)	Expansão (%)	Fonte
Misto	Uso em pavimentos	Rio de Janeiro-RJ	Intermediária	19,0	70,6	0,0	Fernandes (2004)
			Modificada		116,0	0,0	
Misto - sem cura	Estudo em laboratório	São Paulo - SP	Intermediária	50,8	75,0	0,0	Motta (2005)
Misto - cura 28 dias					94,0	0,0	
Misto - cura 90 dias					117,0	0,0	
Misto - cura 180 dias					125,0	0,0	
Misto	Reforço de solo	São Carlos - SP	Normal	60,0	60,0	0,1	Santos (2007)
Misto	Estudo em laboratório e aplicação em campo	Santo André - SP	Intermediária	50,8	73,0	0,0	Leite (2007)
			Modificada		117,0	0,0	
Misto	Indicador	Goiana - GO	Normal	19,1	117,0	0,0	Oliveira (2007)
solo	Confecção de blocos intertravados de pavimentos	São Carlos - SP	Modificada	19,1	195,0	0,0	Grubba (2009)
Concreto+solo					188,0	0,0	
concreto					163,0	0,0	
Misto	Uso em pavimentos	João Pessoa - PB	Intermediária	25,4	40,8	0,2	Nóbrega e Melo (2009)

3 METERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o programa experimental de laboratório utilizado na pesquisa para investigação de um agregado reciclado de RCC para uso em base e sub-base em obras de pavimentação.

3.1 Coleta de amostra

A coleta de agregados reciclados de RCC foi realizada em uma Unidade de Beneficiamento particular, localizada em Camaragibe-PE. Esta empresa de reciclagem opera desde agosto de 2010, recebe 1.000 toneladas/mês de RCC, diariamente, e o material que chega é principalmente de demolição de obras de construção civil, em torno de 78%. A quantidade que chega, ainda é baixa, pois recebe 25% da capacidade produtora, que é cerca de 4.000 ton/dia, com períodos de trabalhos de segunda a sexta-feira. A triagem é realizada manualmente para retirada de materiais plásticos, num primeiro momento e, posteriormente, através de separação magnética, utilizando um imã.

A usina está comercializando brita corrida, além de agregados reciclados nas dimensões 9,5; 19,0; 25,0 e 38,0 mm, separados pelo sistema de peneiras. A Foto 3.1 mostra uma imagem da Usina de Beneficiamento de agregado reciclado de RCC.

Foto 3.1 – Usina de Beneficiamento de Resíduos da Construção Civil (2010).

Para a pesquisa foi realizada a coleta de 05 (cinco) amostras de agregado reciclado de RCC, tipo brita corrida, originada de demolições, foram coletados 125 kg para cada amostra, totalizando 625 kg. Este material era proveniente de diferentes canteiros de obras de construção civil da cidade de Recife - PE.

A programação da coleta foi realizada de acordo com a disponibilidade das atividades da usina de reciclagem, estando os períodos de coleta indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo dos períodos de coletas das amostras de agregado reciclado deste estudo.

Amostra	Período da coleta
1	01 de março de 2011
2	10 de março de 2011
3	21 de março de 2011
4	03 de abril de 2011
5	15 de abril de 2011

Durante a coleta, havia o cuidado para não contaminar os resíduos amostrados, assim, utilizou-se uma lona plástica sobre o solo para recebimento do material diretamente da esteira de saída do britador, conforme a Foto 3.2. O transporte do material coletado foi realizado por meio de um veículo da Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco (POLI/UPE) e enviado até o Laboratório de Mecânica dos Solos da referida instituição.

Foto 3.2 – Coleta do material deste estudo na usina de beneficiamento em Camaragibe – PE.

Quando cada amostra de RCC chegava ao laboratório, fazia-se um peneiramento prévio a fim de limitar o tamanho das partículas do agregado reciclado de RCC, adotando-se o diâmetro máximo de 63,5 mm, sendo descartados aqueles (em torno de 2%) que estavam fora do limite da NBR 15115 (ABNT, 2004). Em seguida, realizava-se homogeneização das amostras (Foto 3.3), antes do seu armazenamento em sacos de ráfias e bombonas. Ressalta-se que o armazenamento foi realizado com cuidado para evitar que partes mais finas fossem perdidas.

Foto 3.3 – Exemplo do material homogeneizado e espalhado no laboratório antes dos ensaios de uma das amostras.

As amostras foram separadas em quantidades de 11 kg para a realização dos ensaios da caracterização física (composição gravimétrica, teor de materiais indesejáveis, análise granulométrica, índice de forma, taxa de absorção, massa específicas das partículas dos agregados passantes e retidas na peneira 4,8 mm); 6 kg para cada energia aplicada no ensaio de compactação (intermediária e modificada); e 36 kg para o ensaio mecânico (Índice de Suporte Califórnia – CBR), sendo 6 kg para cada corpo de prova (no total 06 CP's), considerando-se 03 corpos de prova para energia intermediária e 03 corpos de prova para modificada.

No caso dos ensaios de compactação, destaca-se que foram analisados também a granulometria e forma dos grãos ao final do ensaio de compactação, assim como a granulometria na umidade ótima.

3.2 Ensaios laboratoriais

A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos ensaios físicos e mecânicos de laboratório realizados em cada amostra de agregado de RCC investigada nesta pesquisa.

Tabela 3.2 – Resumo dos ensaios realizados nas cinco amostras de agregado reciclado desta pesquisa.

Ensaios	Tipos		Norma de referência
Caracterização física	Composição gravimétrica		---
	Teor de materiais indesejáveis		NBR 15115 (ABNT, 2004)
	Massa específica das partículas	passantes na peneira 4,8mm	NBR 6508 (ABNT, 1984)
		retidos na peneira 4,8mm	NBR 6458 (ABNT, 1984)
	Absorção de água		NBR 6458 (ABNT, 1984)
	Análise granulométrica (inicial e pós-compactação)		NBR 7181 (ABNT, 1984)
	Forma dos grãos (inicial e pós-compactação)		NBR 6954 (ABNT, 1989) e NBR 15115 (ABNT, 2004)
	Compactação	energia intermediária	NBR 7182 (ABNT, 1986) e NBR 15115 (ABNT, 2004)
		energia modificada	
Caracterização mecânica	Índice de Suporte Califórnia		NBR 9895 (ABNT, 1987)

3.2.1 Caracterização física

3.2.1.1 Composição gravimétrica

A determinação da composição gravimétrica de amostras de agregado reciclado de RCC é uma etapa importante, porque permite correlacionar a influência dos distintos materiais em suas propriedades, tais como, teor de absorção, massa específica, resistência mecânica, dentre outras.

Para a realização deste ensaio, em cada amostra de RCC foi inicialmente realizado o peneiramento na malha de 4,8 mm de abertura, a fim de separar o material considerado miúdo (passante na referida peneira). Em seguida, o material foi segregado por classe de natureza: argamassa, concreto, tijolo, misto (tijolo e argamassa - alvenaria), materiais indesejáveis e material miúdo ($\phi \leq$ 4,8 mm). O material passante na malha 4,8 mm, ou seja, de difícil distinção

visual e classificação, foi classificado como material miúdo. A Foto 3.4 ilustra a segregação dos materiais constituintes do agregado reciclado durante o ensaio de composição gravimétrica.

Foto 3.4 – Exemplo de separação por classe de natureza do agregado reciclado – Ensaio de Composição Gravimétrica.

Após a separação visual dos diferentes constituintes presentes nas amostras de RCC, foram realizadas as pesagens de cada classe, para posterior determinação do percentual em peso de cada constituinte comparado à amostra total. A Foto 3.5 ilustra os constituintes de agregado reciclado de RCC, investigado nesta pesquisa, por classe.

(a) Argamassa.

(b) Concreto.

(c) Tijolo

(d) Misto (tijolo + argamassa).

(e) Material miúdo

(f) Materiais indesejáveis.

Foto 3.5 – Visualização por classe de natureza do agregado reciclado – Ensaio de Composição Gravimétrica de uma amostra deste estudo.

3.2.1.2 Materiais indesejáveis

Os resíduos de construção civil classificados como materiais indesejáveis pela NBR 15115 (ABNT, 2004), são aqueles pertencentes às classes B, C e D da Resolução CONAMA nº 307 (CONAMA, 2002). Tais materiais (por exemplo: madeira, vidro, plástico, gesso, forro, tubulação, fiação elétrica, papel, dentre outros) contaminam e influenciam nos resultados dos ensaios realizados com os agregados reciclados.

Segundo a NBR 15115 (ABNT, 2004), o limite do percentual dos materiais indesejáveis para aplicação como agregado reciclado em pavimentação é de 3% no total, e de mesma constituição limita-se em até 2% em massa.

Para averiguar se a referida norma foi atendida para cada amostra coletada nesta pesquisa, verificou-se este parâmetro em toda a amostra. Desta quantidade, foram identificados, retirados e pesados os materiais indesejáveis.

3.2.1.3 Massa específica das partículas dos agregados

A determinação da massa específica foi dividida em duas etapas, para cada uma das cinco amostras coletadas, analisando-se as partículas dos agregados RCC passantes na peneira de 4,8 mm e, em seguida, os retidos na referida peneira.

- Agregados passantes na peneira 4,8 mm

A massa específica das partículas do agregado reciclado passante na peneira 4,8 mm foi determinada utilizando-se a norma de solos NBR 6508 (ABNT, 1984). Após separar o material miúdo ($ø \leq 4{,}8$ mm), foram preparadas 03 (três) amostras de 60 g (cada) para realização do ensaio. As Fotos 3.6 e 3.7 ilustram etapas de procedimento do ensaio.

Foto 3.6 – Preparação das amostras para massa específica do material passante na peneira 4,8 mm.

Foto 3.7 – Procedimento de retirada de ar entre as partículas com uso de picnômetro e bomba à vácuo.

Após a determinação da massa específica das 03 (três) amostras, utiliza-se o valor médio. Vale salientar que a diferença entre os resultados das amostras analisadas não pode ser superior a 0,02 g/cm³, ou seja, este valor serve para verificar o desvio entre as 03 (três) amostras.

- Agregados retidos na peneira 4,8 mm

A massa específica das partículas dos agregados de RCC retidas na peneira 4,8 mm foi determinada utilizando a expressão (1) com base na norma de grãos de pedregulhos NBR 6458 (ABNT, 1984).

$\delta = Ms / (Ms - Mi) \times \delta_r$ (Expressão 1)

onde:

δ: massa específica dos grãos, em kg/m³;

Ms: massa seca das partículas, em kg;

Mi: massa das partículas imersas, em kg;

δ_r: densidade da água na temperatura do ensaio, obtida na tabela Da NBR 6458 (ABNT, 1984).

Após análise visual e segregação, cada amostra foi separada segundo a natureza de seus materiais (misto, argamassa, tijolo, concreto e materiais indesejáveis). Em seguida, cada grupo de material foi lavado na peneira de abertura de malha 4,8 mm, para que as partículas finas aderidas às partículas graúdas fossem retiradas. Posteriormente, cada grupo foi imerso em água destilada por 24 horas, como mostra a Foto 3.8.

Foto 3.8 – Imersão em água destilada das partículas dos agregados reciclados retidas na peneira 4,8 mm.

A massa específica foi determinada a partir de pesagem hidrostática, utilizando-se para tanto uma cesta de metal acoplada na parte inferior de uma balança, a fim de medir individualmente a massa das partículas de agregados reciclados, por grupo de material, após 24 horas de imersão, como mostra a Foto 3.9.

Foto 3.9 – Pesagem da amostra das partículas dos agregados reciclados retidas na peneira 4,8 mm, após imersão em água destilada durante 24 horas.

Depois desta pesagem, o material foi levado para estufa e permaneceu durante 24 horas a fim de se obter o peso seco e, assim determinar a massa específica do agregado graúdo.

3.2.1.4 Absorção

A realização do ensaio de absorção das partículas dos agregados reciclados retidas na peneira 4,8 mm foi baseada na NBR 6458 (ABNT, 1984), que é aplicada para a determinação da massa específica graúda. O ensaio de absorção do agregado reciclado para as 05 (cinco) amostras coletadas foi executado tomando-se cada grupo de material de natureza individual (misto, tijolo, concreto, argamassa e materiais indesejáveis), como também a amostra de RCC sem segregação, para verificar a influência de cada constituição na amostra como um todo.

Cada grupo amostras de RCC, da mesma maneira que na determinação da massa específica aparente das partículas retidas em 4,8 mm, foi imerso por 24 horas em água destilada, Foto 3.10. A diferença foi que, após 24 horas, o excesso de água presente nos materiais ensaiados foi removido com um pano levemente úmido, e somente em seguida foram pesados. Após a pesagem, foram encaminhados à estufa em temperatura de 105 ºC, durante 24 horas, para posterior medição do peso.

Foto 3.10 – Etapa do ensaio de absorção com amostra de agregado reciclado da fração retida na peneira 4,8 mm, imersa em água destilada.

Para a absorção, assim como, para a massa específica das partículas dos agregados retidas em 4,8 mm, foi feita uma média ponderada para cada amostra coletada, utilizando como pesos o percentual obtido na composição gravimétrica e utilizou a Expressão 2, presente na NBR 6458 (ABNT, 1984).

$S = (M_h - M_s)/M_s \times 100$ (Expressão 2)

onde:

S: teor de absorção de água, em %;

M_h: massa do material na condição saturada, superfície seca, em g;

M_s: massa do material seco, em g.

$S = (M_h - M_s$

3.2.1.5 Análise granulométrica

Os ensaios de granulometria das 05 (cinco) amostras de RCC foram realizados de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984). Utilizou-se 11 kg para cada amostra, na análise da granulometria original do resíduo reciclado. Ressalta-se que ainda foram conduzidos ensaios de granulometria de RCC reciclado nas amostras após a realização dos ensaios de compactação, verificando desta maneira a influência do processo de compactação no comportamento da granulometria.

Estes ensaios foram realizados em duas etapas, ou seja, por peneiramento e sedimentação. Para a primeira etapa com lavagem prévia na peneira 0,075 mm para retirar partículas finas aderidas. Após a lavagem inicial, o material foi levado para estufa a 105ºC, por 24 horas. O peneiramento do material seco foi realizado com o uso da série de 12 peneiras, conforme a NBR 7181 (ABNT, 1984). As Fotos 3.11 e 3.12 ilustram os materiais encontrados em cada peneira utilizada no ensaio de granulometria, fração miúda e graúda, respectivamente.

Foto 3.11 – Exemplos de frações granulométricas miúdas de uma das amostras de agregados reciclados de RCC deste estudo.

Foto 3.12 – Exemplos de frações granulométricas graúdas de uma das amostras de agregados reciclados de RCC deste estudo.

Neste ensaio, foram determinados dois coeficientes, os coeficientes de curvatura (Cc) e de uniformidade (Cu). O primeiro representa se a amostra é bem-graduada, caso o valor fique entre os limites 1 e 3. Já o coeficiente de uniformidade, mostra se existe uniformidade dos grãos, ou seja, se obtiver valores como Cu < 5 – muito uniforme; 5 < Cu < 15 – de uniformidade média; Cu > 15 – desuniforme (CAPUTO, 1977).

A granulometria ideal para os agregados é ser bem-graduada e é determinada pelos coeficientes acima citados. Quando a granulometria for heterogênea haverá uma minimização de possíveis recalques no pavimento, devido um baixo índice de vazios, contudo, ainda assim, dependem da resistência das partículas à aplicação dos golpes durante a compactação.

Para a aplicação em obras de pavimentação, as normas brasileiras existentes referentes a agregados reciclados não instituem limites granulométricos ao uso, contudo impõem faixas para a porcentagem da fração miúda passante na peneira de abertura 0,42 mm, para Cu e Cc, conforme foi mencionado no item 2.5 na Tabela 2.5, que mostra os limites para estes coeficientes, segundo a NBR 15115 (ABNT, 2004), além da Tabela 2.7 do item 2.5.1.5 que apresenta os limites destes coeficientes da PMSP/SP ETS-001 (PMSP, 2003).

3.2.1.6 Forma dos grãos

A classificação da forma dos grãos das 05 (cinco) amostras de RCC foi realizada segundo a NBR 6954 (ABNT, 1989). Esta norma estabelece como metodologia de determinação o uso de um paquímetro, medindo-se três dimensões: comprimento (a), largura (b) e altura (c), para cada partícula, classificando-os como cúbico, alongado, lamelar ou alongado-lamelar. A Tabela 3.3 mostra os valores adotados na classificação. O limite estabelecido pela NBR 15115 (ABNT, 2004) para agregado reciclado é no máximo 30% de grãos lamelares.

Tabela 3.3 – Classificação da forma dos grãos conforme NBR 6954 (ABNT, 1989).

Média das relções b/a e c/b	Classificação da forma
b/a > 0,5 e c/b > 0,5	Cúbica
b/a < 0,5 e c/b > 0,5	Alongado
b/a > 0,5 e c/b < 0,5	Lamelar
b/a < 0,5 e c/b < 0,5	Alongado-lamelar

Para cada amostra de RCC investigada nesta pesquisa, foi realizado o peneiramento nas peneiras 38,1 ; 25,4; 19,1 e 9,54 mm. O material retido em cada peneira foi então separado por grupo de natureza (misto, tijolo, argamassa e concreto) e, então, realizou-se a medição das dimensões (comprimento, largura e altura) utilizando-se um paquímetro analógico (Foto 3.13). A Foto 3.14 ilustra exemplos de forma de partículas antes a compactação.

Foto 3.13 – Ilustração da realização do ensaio de índice de forma dos agregados graúdos desta pesquisa.

Foto 3.14 – Exemplo das formas das partículas antes da compactação.

3.2.1.7 Ensaios de compactação

A realização do ensaio de compactação foi baseada na NBR 7182 (ABNT, 1986), sendo empregadas as energias intermediária e modificada, com reuso de material. Ao final de cada ensaio, foram realizados os ensaios de granulometria e forma das partículas para verificar a influência do mecanismo de compactação. Foram também conduzidos ensaios de compactação no agregado reciclado para a condição de umidade ótima, sem reuso de material, verificando-se

também a influência apenas na granulometria, para ambas as energias, exceto para amostra 4, que foi realizado apenas na energia intermediária, devido a falta de material, ocasionada pela heterogeneidade das amostras que fez necessário descartar material com diâmetro superior ao limite da NBR 15115 (ABNT, 2004), como também, este ensaio de compactação na umidade ótima, não estava previsto, porém foi realizado para analisar a influência da quebra das partículas pela aplicação de uma quantidade crescente de golpes aplicados.

- Determinação da umidade ótima e peso específico aparente seco máximo

A preparação da amostra, segundo a NBR 6457 (ABNT, 1986), para ensaios de compactação define que para o material a ser ensaiado, pode-se substituir a fração retida na peneira 19 mm, desde que esta seja entre 10 e 30% do peso total da amostra. Este material deve ser substituído pela fração retida entre as peneiras 19 e 4,8 mm.

Os equipamentos utilizados nos ensaios foram um soquete grande (com aproximadamente 4,5kg) e um cilindro metálico grande (150 mm de diâmetro e 300 mm de altura), com disco espaçador (Foto 3.15). A compactação foi realizada em 05 (cinco) camadas, sendo cada camada compactada com 26 golpes (intermediária) e 55 golpes (modificada). Neste ensaio foram utilizados 6 kg de amostra para cada energia, com reuso de material para a compactação em cada ponto. As Fotos 3.16 e 3.17 ilustram, respectivamente, a extração de um corpo de prova moldado com o agregado reciclado de RCC e corpos de prova, após a compactação.

Foto 3.15 – Execução do ensaio de compactação.

Foto 3.16 – Desmoldagem do corpo de prova após a execução do ensaio de compactação.

Foto 3.17 – Exemplos de corpo de prova de RCC deste estudo, após execução do ensaio de compactação.

- Análise da influência da compactação na Granulometria e Forma

As análises foram feitas para cada amostra de agregados reciclados de RCC desta pesquisa: na análise granulométrica após ensaios de compactação (na umidade ótima) e ao final da compactação (com reuso do material); nas energias intermediária e modificada, exceto na amostra 4; ensaios granulométrico pós-compactação na umidade ótima (apenas na energia intermediária) e ao final da compactação (nas energias intermediária e modificada). Para o índice de forma foram realizados, somente, o ensaio ao final da compactação.

3.3 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica dos agregados reciclados de RCC foi realizada em laboratório, a partir do Índice Suporte Califórnia (ISC).

3.3.1 Índice de suporte Califórnia

O ensaio foi realizado nas 05 (cinco) amostras coletadas de agregados reciclados de RCC e foram aplicadas as energias intermediária e modificada, sendo 03 (três) amostras de cada coleta para cada energia, perfazendo um total de 06 (seis) para todas as amostras.

A realização do ensaio de determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) seguiu os procedimentos da NBR 9895 (ABNT, 1987), sendo também determinada a expansibilidade do material. Os equipamentos utilizados para moldar os corpos de prova foram os mesmos do ensaio de compactação, mencionado no item 3.2.2. Para a ruptura foi usada uma prensa com penetrômetro. Os parâmetros de ISC e Expansibilidade foram analisados segundo especificação da NBR 15115 (ABNT, 2004) para camadas de pavimento com agregados reciclados, conforme item 2.6.3.1.

As Fotos 3.18 a 3.20 ilustram a execução dos ensaios indicando, respectivamente, a etapa de compactação nas energias intermediária e modificada; a imersão dos corpos de prova (durante 24 horas, com leituras diárias) após compactação para verificar a expansibilidade do material; e, por fim, corpo de prova sendo submetido ao carregamento/penetração, com medição no extensômetro, a fim de determinar o ISC.

Foto 3.18 – Compactação de corpo de prova.

Foto 3.19 – Imersão dos corpos de prova do ensaio de ISC.

Foto 3.20 – Corpo de prova submetido ao carregamento (A) e leitura da penetração no extensômetro (B) do ensaio de ISC.

Foram analisadas as curvas resultantes e cada ponto das 05 amostras coletadas, para cada corpo de prova nas duas energias aplicadas, sendo possível verificar o coeficiente de variação entre resultados obtidos e, assim identificar qual amostra coletada teve menor grau de variabilidade (dispersão).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises dos dados obtidos no programa experimental realizado em laboratório nas 05 (cinco) amostras de agregado reciclado de RCC (brita corrida), obtidas em uma Unidade de Beneficiamento em Camaragibe-PE.

4.1 Caracterização física do agregado reciclado

4.1.1 Composição gravimétrica e Teor de materiais indesejáveis

A separação e identificação visual de cada material constituinte do agregado reciclado de RCC estudado apresentaram a seguinte classificação: argamassa e concreto (cimentícios), tijolo, misto (alvenaria), material miúdo e materiais indesejáveis. A Figura 4.1 mostra os percentuais dos materiais encontrados nos ensaios de composição gravimétrica das amostras da pesquisa.

Os resultados da Figura 4.1 indicaram que os resíduos investigados apresentam variabilidade diferente para cada um de seus constituintes, tendo em vista características do próprio material, o qual é dependente da fase da obra em que foi coletado. Nota-se que a variação das amostras dependeu da data da coleta do material na usina de reciclagem. Verifica-se que nas amostras 1 e 4 os materiais predominantes foram argamassa, concreto e tijolo, sendo o percentual de material miúdo baixo (5,3 a 9,2%). Já nas amostras 2 e 3, a tendência foi uma maior presença do material miúdo (40,5 a 47,2%), seguido dos materiais cimentícios (argamassa e concreto) e cerâmicos (tijolo). No caso da amostra 5, houve predominância de material miúdo (52,7%), material cerâmico (28,2%) e misto (11,7%); para os materiais cimentícios (argamassa e concreto) o valor obtido foi baixo (5,2% no total).

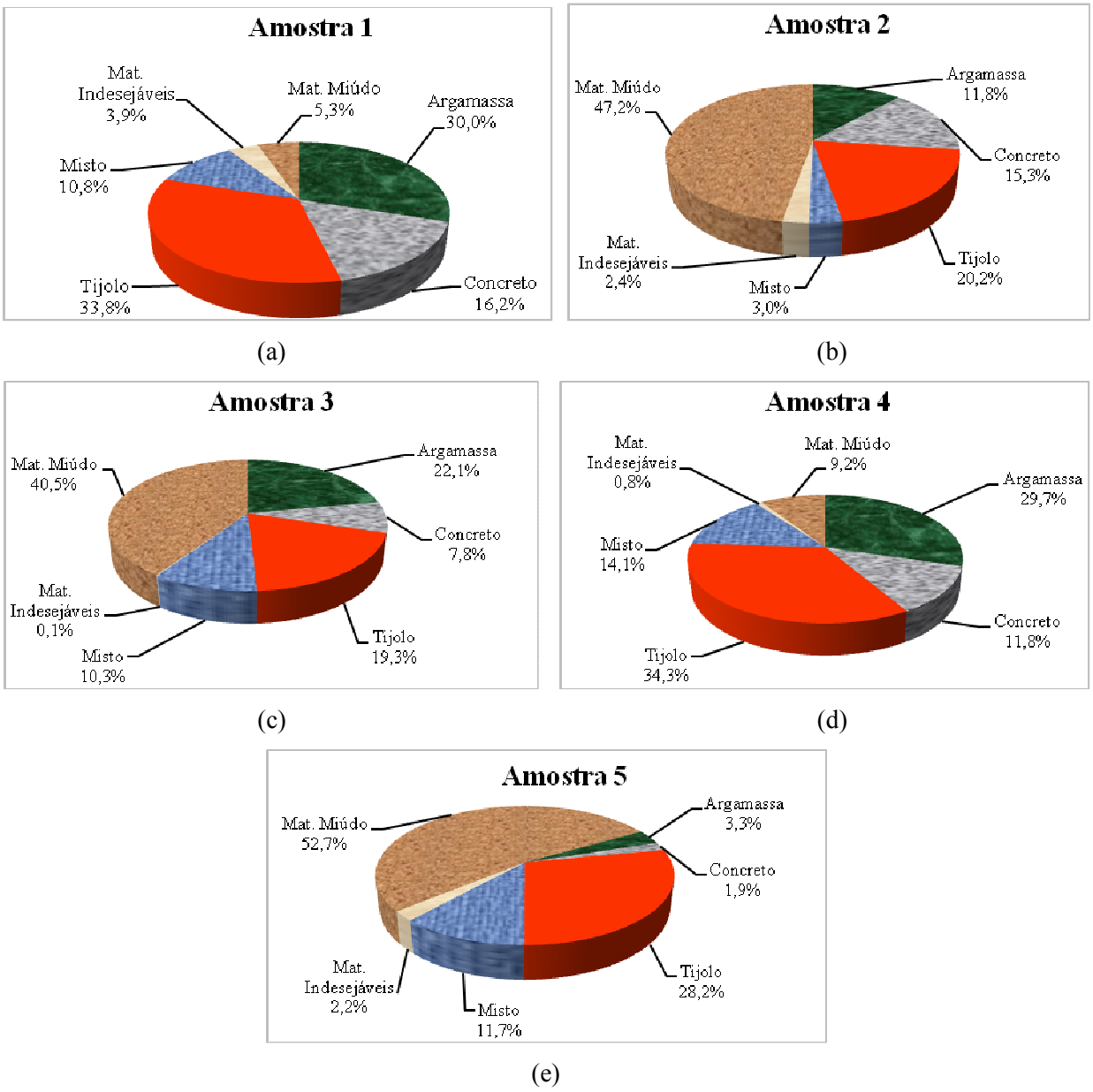

Figura 4.1 – Composição gravimétrica do agregado reciclado de RCC das amostras estudadas.

Os valores apresentados na Tabela 4.1 mostram valores das médias, desvios padrões e coeficiente de variação dos componentes para cada material constituinte. Os resultados indicam amostras heterogêneas entre si, cujos valores de desvio padrão foram altos mostrando a dispersão entre os materiais segundo Piana *et al*. (2009). As amostras de RCC estudadas são classificadas como mista, uma vez que a quantidade de materiais cimentícios apresentada é inferior a 90% da mesma forma que Leite (2007).

Tabela 4.1 – Resumo da composição gravimétrica das amostras: composição por constituinte, média e desvio padrão.

Amostra	Composição (%)					
	Argamassa	Concreto	Tijolo	Misto (tijolo+argamassa)	Materiais indesejáveis	Material miúdo
1	30,0	16,2	33,8	10,8	3,9	5,3
2	11,8	15,3	20,2	3,0	2,5	47,2
3	22,1	7,8	19,3	10,3	0,1	40,5
4	29,7	11,8	34,3	14,1	0,8	9,2
5	3,3	1,9	28,2	11,7	2,2	52,7
Média	**19,4**	**10,6**	**27,1**	**10,0**	**1,9**	**31,0**
Desvio padrão	**11,7**	**5,9**	**7,2**	**4,1**	**1,5**	**22,1**
Coef. de Variação (%)	**60,2**	**55,6**	**26,4**	**41,6**	**78,0**	**71,5**

Esta variabilidade na composição dos resíduos, também foi observada por outros autores, tais como: Zordan (1997), Leite (2001), Vieira e Molin (2004), Carneiro (2005), Motta (2005), Morais (2006), Hood (2006), Leite (2007), Nóbrega e Melo (2009), Lira Jr. (2010) e Rodrigues (2011).

Segundo a NBR 15115 (ABNT, 2004), a quantidade máxima permitida para estes materiais é 3%. Neste aspecto, apenas a Amostra 1 apresentou valor que ultrapassa o valor limite da norma. Vale salientar que este índice é dependente da qualidade da segregação no canteiro de obra e na unidade de reciclagem. Um fato observado é mesmo que a média do teor de materiais indesejáveis (1,9%) encontra-se dentro do limite da referida norma. Contudo, conforme a Tabela 4.1, tanto para o teor de materiais indesejáveis quanto para os outros componentes das amostras o coeficiente de variação foi muito alto, que indica que as amostras são bastante heterogêneas entre si e apresentaram coeficientes de variação (CV) elevados, com valores acima de 30%, ou seja, apresentaram uma grande dispersão entre os valores das coletas (PIMENTEL-GOMES, 1985; GARCIA, 1989).

Considerando as amostras individualmente, todas, exceto a amostra 1, atenderam a norma NBR 15115 (ABNT, 2004), com baixa presença de materiais contaminantes, assim como foi observada

em pesquisas realizadas Zordan (1997), Leite (2001), Vieira e Molin (2004), Carneiro (2005), Motta (2005), Leite (2007), Macedo (2008), Nóbrega e Melo (2009) e Silva (2009).

4.1.2 Massa específica das partículas dos agregados

A apresentação dos resultados da massa específica das partículas dos agregados reciclados é feita separadamente, ou seja, para as partículas de agregados reciclados passantes e retidos na peneira 4,8 mm.

A Tabela 4.2 mostra que os valores da massa específica de partículas passantes na peneira 4,8 mm e retidas na mesma peneira e com diâmetro máximo de 63,5 mm, de cada amostra de RCC, variaram de 2.567,2 a 2.791,8 kg/m³ para as frações passantes e de 2.548,2 a 2.635,3 kg/m³ para as frações retidas, com valor médio de 2.651,7 e 2.594,9 kg/m³ para passantes e retidas, respectivamente, além de ter um apresentar um coeficiente de variação inferior a 5%, ou seja, o grau de dispersão foi pequeno entre as 05 (cinco) amostras.

Tabela 4.2 – Massa específica média das partículas passantes e retidas na peneira 4,8 mm, de cada coleta do agregado reciclado.

Massa específica média dos grãos δ (kg/m³)							**Desvio Padrão**	**Coef. de Variação (%)**
Amostra	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Média**		
Fração passante na # 4,8 mm	2.567,2	2.633,8	2.651,3	2.614,7	2.791,8	2.651,7	84,3	3,2
Fração retida na # 4,8 mm	2.630,2	2.584,9	2.575,9	2.548,2	2.635,3	2.594,9	37,1	1,4

Os valores de massa especifica das 05 (cinco) amostras encontram-se dentro da faixa de valores obtidos em pesquisas da literatura com agregado reciclado de RCC, tais como: Leite (2001), Vieira (2003), Hood (2006), Leite (2007), Macedo (2008), Medeiros Jr. (2008), Silva (2009) e Rodrigues (2011), apresentados no item 2.5.1.3 na Tabela 2.5.

A origem dos materiais constituintes dos resíduos influencia na massa específica. No caso desta pesquisa, as amostras 2, 3 e 5 apresentaram valores um pouco mais elevados devido à maior

presença de material miúdo. Dias e Angulo (2005) investigaram resíduos com predominância de material cerâmico e encontraram valores mais baixos, variando entre 1.480,0 a 2.120,0 kg/m³.

Pode-se observar que os valores obtidos da massa específica das partículas dos agregados retidos na peneira 4,8 mm (2.550,0 a 2.640,0 kg/m³) são inferiores aos correspondentes das partículas passantes (2.570,0 a 2.790,0 kg/m³). Tal comportamento também foi verificado em outras pesquisas realizadas, tais como, Zordan (1997), Carneiro (2005), Leite (2007), Silva (2009) e Rodrigues (2011), cujos valores ficaram entre 1.090,0 e 2.650,0 kg/m³.

A Tabela 4.3 apresenta os valores de massa específica de partículas dos agregados reciclados retidas na peneira 4,8 mm, de acordo com cada material constituinte do resíduo. Constata-se que nas amostras 1 e 5, os materiais cerâmicos (tijolo) apresentaram maior massa específica comparado aos constituintes cimentícios e mistos. Já nas amostras 2, 3 e 4 todos os tipos de materiais tiveram valores de massa específica, mais próximos entre si.

Tabela 4.3 – Massa específica das partículas retidas na peneira 4,8 mm das amostras coletadas dos agregados reciclados, conforme cada natureza dos constituintes.

Material constituinte	**Massa específica das partículas dos agregados δ (kg/m³)**				
	Amostras				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Argamassa	2.586,7	2.590,6	2.563,3	2.548,5	2.612,2
Concreto	2.625,0	2.589,7	2.601,1	2.574,2	2.536,9
Tijolo	2.689,9	2.583,3	2.591,7	2.534,3	2.666,5
Misto (Tijolo+argamassa)	2.578,3	2.564,5	2.554,6	2.558,2	2.600,2

Leite (2007) observou distinção da massa específica por constituição, ou seja, materiais cimentícios (2.750,0 kg/m³) obtiveram valor superior de massa que os constituintes cerâmicos, entre 2.500,0 e 2.550,0 kg/m³, o que foi justificado pelo autor, conforme a concentração do material cimentício com cerca de 55,3% do total da amostra.

4.1.3 Absorção

O teor de absorção das amostras de RCC, considerando-se todos os materiais constituintes, apresenta-se na Tabela 4.4. Os resultados variaram entre 13,1 a 14,9%, ou seja, com pouca diferença, mesmo sendo resíduos com composição gravimétrica distinta.

Tabela 4.4 – Teor de absorção das partículas retidas na peneira 4,8 mm dos agregados reciclados por constituinte e da material total.

Material constituinte	**Amostras**										**Média**		**Coef. de Variação (%)**	
	1		**2**		**3**		**4**		**5**					
Parâmetro	**A**	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**
Argamassa	10,4	30,0	10,2	11,8	10,7	22,1	10,4	29,7	14,1	3,3	11,2	19,4	14,8	60,2
Concreto	6,4	16,2	5,7	15,3	9,1	7,8	9,5	11,8	7,6	1,9	7,7	10,6	21,6	55,6
Tijolo	13,3	33,8	17,1	20,2	14,8	19,3	14,1	34,3	18,0	28,2	15,5	27,1	13,0	26,4
Misto (alvenaria)	11,3	10,8	13,4	3,0	12,6	10,3	12,6	14,1	14,6	11,7	12,9	10,0	9,4	41,6
Material miúdo	--	5,3	--	47,2	--	40,5	--	9,3	--	52,7	--	31,0	--	71,4
Amostra Total	13,1	--	14,0	--	13,8	--	14,9	--	13,2	--	13,8	--	5,4	--

Absorção (%) - A Composição (%) - B

Analisando-se pesquisas realizadas com agregado misto, assim como nesta pesquisa, I&T (1990 *apud* LIMA, 1999), Leite (2007) e Leite e Lima (2009), os teores de absorção dos agregados reciclados de RCC apresentavam valores que variaram entre 3% e 12,2%.

Conforme a Tabela 4.4, observa-se a variação do teor de absorção por material constituinte, de cada amostra. Verifica-se que dentre os constituintes dos resíduos, quanto maior a presença de material miúdo maior capacidade de absorção. Outro fator observado é que o coeficiente de variação do teor de absorção de cada constituinte foi alto, mostrando a heterogeneidade das 05 amostras.

Em pesquisas realizadas por constituintes de agregado reciclado, tais como Angulo (2005), Carneiro (2005), Leite (2007), Cabral (2007) e Fonseca (2007), verificou-se maior capacidade de absorção dos materiais cerâmicos (variando entre 8,7 a 32,4%) em relação aos outros constituintes (variando entre 2 e 20,5%) , confirmando a constatação dos ensaios deste estudo.

A Figura 4.2 mostra a influência dos materiais constituintes das amostras no teor de absorção. A constituição do agregado reciclado age no teor de absorção, pois a presença de materiais cerâmicos e argamassas influenciaram no aumento da absorção da amostra, enquanto que foi observado que, quando se diminui a quantidade de concreto, ocorre um aumento mais significativo na absorção.

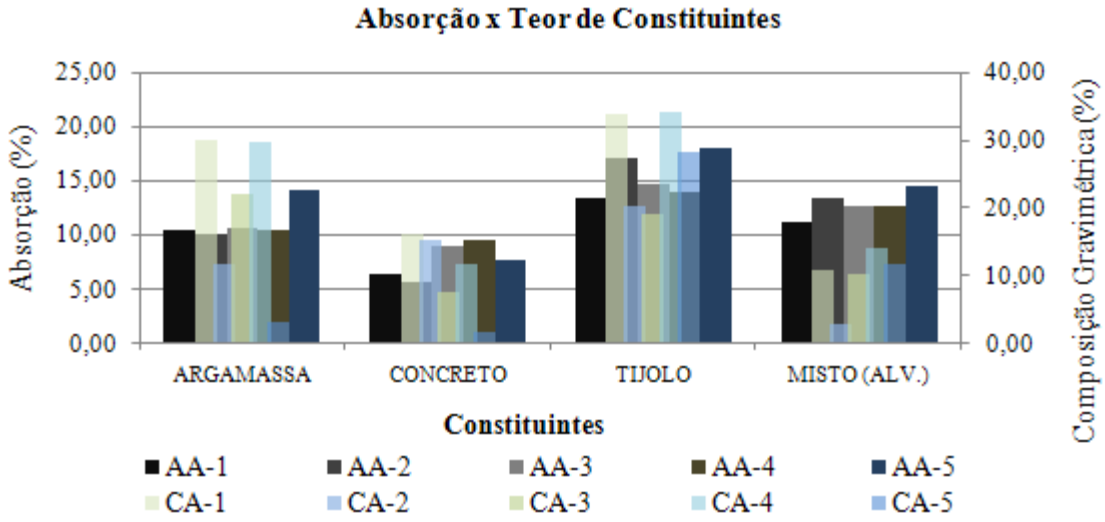

Figura 4.2 – Teor de absorção influenciado pelos constituintes do agregado reciclado de RCC.

4.1.4 Granulometria

A granulometria original das amostras de RCC está apresentada na Figura 4.3. Verifica-se que quanto à dimensão máxima dos grãos ($\phi \leq 63{,}5$ mm), após peneiramento prévio na # 63,5 mm ficou retido cerca de 2% ou 2,5 kg, todas as amostras atendem à NBR 15115 (ABNT, 2004).

Os agregados de resíduos estudados apresentaram suas frações em faixa granulométrica de pedregulho e areia, distribuídos como material tipo brita corrida. As amostras 1, 2, 3 e 4 apresentaram maior quantidade de material correspondente à fração de pedregulho, para a amostra 5 teve a maior presença de material miúdo, conforme Tabela 4.5.

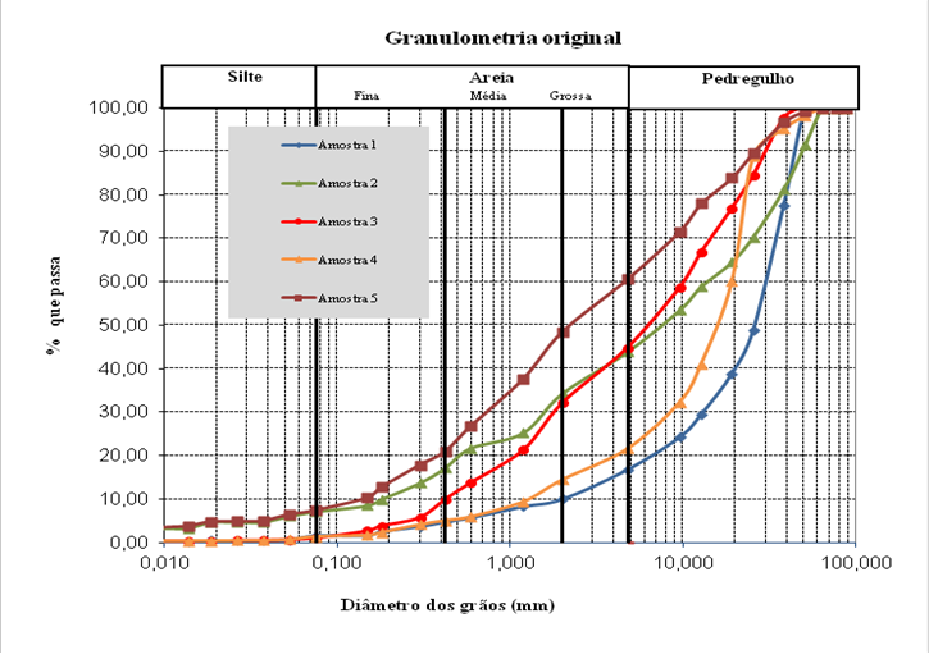

Figura 4.3 – Granulometria original do agregado reciclado de RCC.

Tabela 4.5 – Distribuição das frações (%) da curva granulométrica original das amostras.

Percentual das frações por constituintes

Fração granulométrica	Diâmetro equivalente (mm)	Amostras				
		1	2	3	4	5
Pedregulho	$63,5 < \phi < 4,76$	93,82	52,80	50,92	66,08	31,58
Areia grossa	$2,00 < \phi < 1,19$	2,37	13,90	16,35	10,22	18,46
Areia média	$0,59 < \phi < 0,30$	2,28	12,90	13,56	6,96	16,57
Areia fina	$0,018 < \phi < 0,075$	1,08	7,72	8,31	6,11	12,96
Silte	$0,053 < \phi < 0,026$	0,19	5,58	5,75	5,35	9,19
Argila	$0,019 < \phi < 0,001$	0,25	7,11	4,82	5,42	10,87

A partir das curvas granulométricas, foram determinados os correspondentes coeficientes de uniformidade (C_u) e curvatura (C_c), conforme Tabela 4.6. Os resultados indicam que estes coeficientes atendem à NBR 15115 (ABNT, 2004), que estabelece que o valor do coeficiente de uniformidade seja menor que 5 e coeficiente de curvatura, fique entre 1 e 3, conforme Caputo (1977), ou seja, os agregados reciclados estudados estão classificados como material bem graduado, exceto para as amostras 1, 3 e 4, que apresentam-se mal graduados.

Tabela 4.6 – Parâmetros obtidos da curva granulométrica original das amostras.

Parâmetros	Amostras					NBR 15115 (ABNT, 2004)
	1	2	3	4	5	Limites
Cu	8,0	42,3	21,5	9,6	32,0	≥ 10
Cc	2,0	1,0	0,5	2,4	2,0	não consta
Percentual passante # 0,42 mm (%)	4,7	17,1	10,0	5,1	21,0	10 ≤ a ≤ 40

O percentual de material passante na peneira 0,42 mm, segundo a NBR 15115 (ABNT, 2004), deve ficar entre 10 e 40%. Nesta pesquisa, este critério foi atendido para as amostras de RCC, exceto para as amostras 1 e 4, que apresentaram valores 4,7 e 5,1%, respectivamente (Tabela 4.6). Em pesquisas realizadas por Motta (2005), Carneiro (2005), Ulsen (2006) e Leite (2007), os valores foram 10%; entre 4,5 e 12,3%; entre 10 e 18%; e 21,2%, respectivamente.

As curvas granulométricas das amostras 2 e 5 de agregados reciclados estudados, assemelham-se a outras pesquisas Motta (2005), Carneiro (2005), Ulsen (2006), Leite (2007), Grubba (2009) e Lira Jr. (2010), que também apresentaram uma granulometria bem graduada.

4.1.5 Análise da forma

A Tabela 4.7 apresenta o resultado da análise da forma original das partículas dos agregados reciclados de RCC das amostras estudadas.

Tabela 4.7 – Forma das partículas em percentual para as amostras de agregado reciclado de RCC.

Amostra	Cúbica	Lamelar	Alongada	Alongada -Lamelar
1	48,2	30,2	18,3	3,3
2	45,2	29,6	21,8	3,3
3	48,7	30,1	19,9	1,3
4	49,3	30,5	18,7	1,4
5	51,1	27,8	18,9	2,1

A recomendação da NBR 15115 (ABNT, 2004) sobre o percentual máximo de grãos lamelares é de 30% (sendo no máximo 0,5% acima dos 30%), já o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006)

informa que deve haver predominância de grãos cúbicos para os agregados naturais (acima de 50%).

Pela Tabela 4.7, a forma lamelar nas Amostras 1, 3 e 4 ficaram acima discretamente de 30% do limite, exceto as amostras 2 e 5, com valores de 29,6% e 27,8%, respectivamente, atendendo à norma quanto sua forma original. Leite (2007) encontrou para os agregados reciclados de RCC um percentual de partículas de forma lamelar 38,8%, não atendendo as especificações de NBR 15115 (ABNT, 2004).

Com base no Manual da Pavimentação, somente a amostra 5 atende à especificação sobre o percentual cúbico, ou seja, com predominância da forma original cúbica dos agregados; já as demais amostras apresentaram valores inferiores.

Outros autores que pesquisaram a forma das partículas dos agregados, encontraram os seguintes valores para a forma cúbica, dentro das especificações do Manual da Pavimentação (DNIT, 2006): Roni *et al.* (2008 *apud* SILVA, 2009), 73%; Motta (2005), acima de 50%; Leite (2007), 55,7%; e Silva (2009), 88%.

4.1.6 Ensaio de compactação

A Figura 4.4 mostra as curvas de compactação das amostras de RCC, para ambas as energias utilizadas, enquanto que a Figura 4.5 ilustra uma comparação dos resultados das amostras por energia de compactação.

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram que o incremento de energia causa causou um aumento do peso específico aparente seco máximo, com um menor teor de umidade, o que já era esperado. Outro fato constatado é a influência da presença de material miúdo e concreto (resistentes aos golpes) e a baixa resistência da argamassa, material misto (argamassa + tijolo) e tijolo, nas curvas de compactação das amostras de RCC, como verificado nas Amostras 1, 2, 3, 4 e 5.

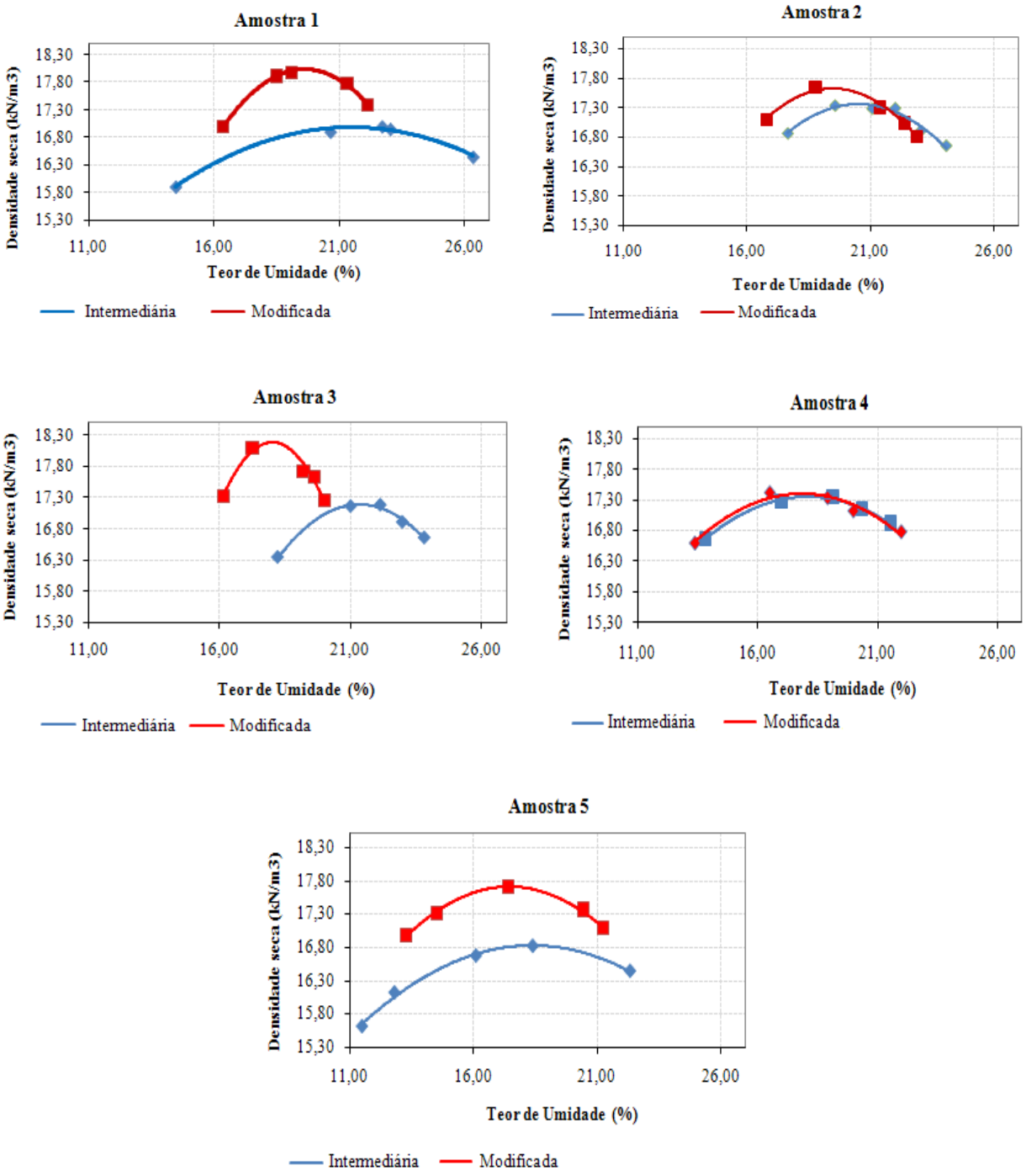

Figura 4.4 – Curvas de compactação para energias intermediária e modificada (continuação).

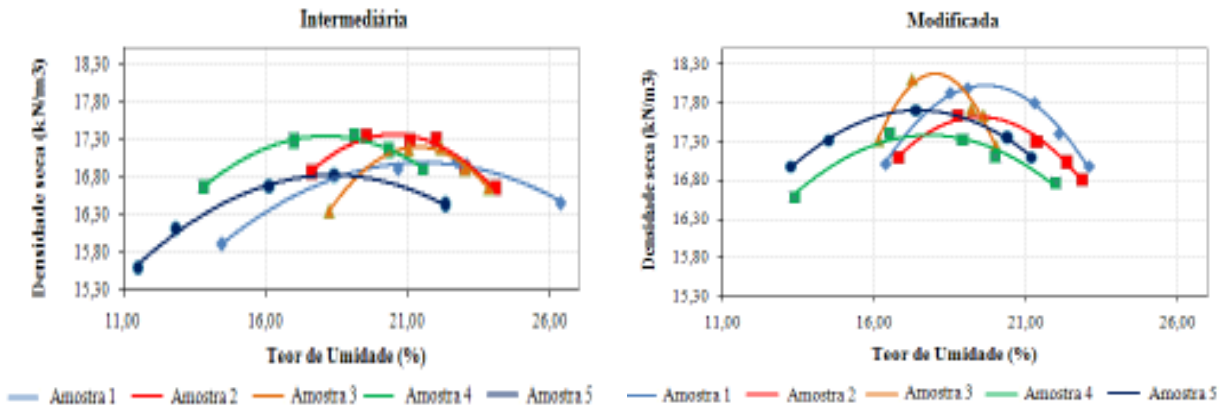

Figura 4.5 – Comparações das curvas de compactação para energias intermediária e modificada.

A Amostra 1 apresentava maior quantidade de tijolo e argamassa (pouco resistentes), além de presença significativa de concreto e pequena de material miúdo, (materiais resistentes aos golpes) causa uma alteração da curva mais branda, visto que a aplicação dos golpes aumentam em menor intensidade o percentual de finos.

Para as Amostras 2 e 3 havia uma grande quantidade de material miúdo e percentuais altos de argamassa e tijolo, além da maior presença de concreto na Amostra 2, que causou uma menor variação das curvas aos incrementar energia de golpes em relação a Amostra 3.

A Amostra 5 possuía uma maior quantidade de material miúdo, como também, grandes percentuais de tijolo e material misto (tijolo + argamassa), portanto devido a presença do material fino faz com que a variação das curvas sejam mais acentuadas e com valores elevados de peso específico aparente seco.

Entretanto, na Amostra 4, não houve uma diferença significativa entre as curvas de energias distintas, visto que foi uma amostra que possuía maior presença de tijolo e argamassa, material pouco resistente, além de um baixo percentual de material miúdo, ou seja com a aplicação dos primeiros golpes ocorrem as fragmentação da partículas mais significativas, aumentando o percentual de material fino, que torna a amostra mais resistente.

Segundo a Figura 4.5, as Amostras 2 e 4, na energia intermediária, tiveram os maiores valores de peso específico, em diferentes umidades ótimas, fato que não foi constatado na aplicação da

energia modificada. Contudo, as curvas para as amostras 1, 3 e 5 apresentaram-se conforme o esperado, ou seja, aquelas compactadas com energia modificada tiveram maior peso específico e menor umidade ótima.

A quantidade de partículas lamelar da Amostra 4 possuir maior quantidade de forma lamelar, o que influenciou na proximidade da curva de compactação, pois através da aplicação da energia as partículas sofrem uma quebra, que aumenta a quantidade de formas cúbicas, que são mais estáveis e resistentes a acréscimo de energia de compactação, não causando uma variação da forma perceptível na aplicação das energias distintas, conforme será verificado no item 4.1.6.1. Outro fator observado é que nesta amostra observou-se um ganho na resistência pela presença de maior quantidade de material miúdo, que tendem a preencher os vazios entre as partículas, mesmo com uma grande quantidade de materiais cerâmicos e argamassa, os quais não apresentam grande resistência na compactação.

Na Amostra 1, mesmo apresentando composição gravimétrica semelhante a amostra 4, apresentou curvas de compactação distinta, tal fato pode ocorrer devido a heterogeneidade da constituição do RCC .

A obtenção da umidade ótima para agregados reciclados não é uma tarefa fácil, como é observado na literatura Fernandes (2004) e Leite (2007). Um dos fatores é a heterogeneidade do material, que gera dificuldade na obtenção da curva de compactação, visto que, por exemplo, materiais cerâmicos tendem a ter uma maior capacidade de absorção.

A Tabela 4.8 apresenta um resumo dos valores obtidos de peso específico seco máximo e umidade ótima para cada amostra de RCC, em ambas as energias. Os valores do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima, nesta pesquisa, apresentado nesta Tabela, têm variações pequenas, como notado pelo valor do coeficiente de variação baixo. Verifica-se que há semelhança das médias das amostras desta pesquisa, conforme a diferença de energia aplicada, sendo tal comportamento também observado em outras pesquisas utilizando agregados de RCC, tipo misto, conforme citadas no item 2.5.1.7.

Outro fator observado na Tabela 4.8, é nas amostras que tinham maiores percentuais de material miúdo, as Amostras 2 e 3, além da amostra 1 devido a presença de materiais com alta capacidade de absorção como tijolos e argamassa, os valores da umidade ótima foi elevado. Para a Amostra 5, mesmo possuindo uma quantidade de material miúdo e materiais com capacidade de absorção, o valor de umidade foi inferior aos demais, mostrando a heterogeneidade das amostras.

Tabela 4.8 – Peso específico aparente seco e umidade ótima para as amostras de agregado reciclado.

Energia	Parâmetros	Amostras					Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
		1	2	3	4	5			
Proctor Intermediário	Peso específico aparente seco - $\gamma_{máximo}$ (kN/m³)	17,0	17,4	16,9	17,3	16,9	17,1	0,3	1,48
	Umidade Ótima - $\omega_{ót}$ (%)	21,5	20,3	21,2	18,1	18,5	19,9	1,5	7,78
Proctor Modificado	Peso específico aparente seco - $\gamma_{máximo}$ (kN/m³)	18,1	17,6	18,0	17,9	17,7	17,9	0,2	1,18
	Umidade Ótima - $\omega_{ót}$ (%)	19,8	19,3	18,0	17,8	17,4	18,4	1,0	5,48

Fernandes (2004) encontrou valores de peso específico seco máximo e umidade ótima, respectivamente, entre 18,3 e 18,5 kN/m³; e 12,5 e 13,8%; já Leite (2007) obteve 17,6 e 18,2 kN/m³ e 14,6 e 13,5%, ambos nas energias intermediária e modificada. Além de pesquisas aplicando energias de compactação em RCC com materiais do tipo misto ou de apenas um tipo de material (cerâmico, cimentício), outros autores obtiveram valores de peso específico e umidade ótima, como Motta (2005) 18,3 kN/m³ e 11,0%; Santos (2007) entre 17,9 a 18,9 kN/m³ e 13,0 a 17,8%, Macedo (2008) entre 15,7 a 17,5 kN/m³ e 14,0 a 21,0%; Grubba (2009) entre 17,8 a 20,3 kN/m³ e 11,0 a 21,2%; e Lira Jr. (2010) 15,8 kN/m³ e 17,5%.

4.1.6.1 Influência da compactação na granulometria e forma dos agregados

O processo de compactação pode causar a quebra das partículas e, assim, mudanças nas características das partículas do material estudado, como é o caso da granulometria e forma. Tal fato favorece a vida útil do pavimento, pois grande parte da quebra das partículas ocorre na compactação, evitando-se possíveis afundamentos futuros (durante o uso) e rupturas indesejadas.

A quebra das partículas do agregado causada pela compactação pode ser benéfica, pois caso um material não atendesse ao projeto no início, coeficientes de uniformidade e curvatura, além do

percentual de partículas passantes na peneira 0,42 mm, com a quebra poder-se-ia atender às especificações de projetos, visto que com a compactação há melhorara na graduação do material, porém a quebra, caso seja continuada pode favorecer ao afundamento do pavimento.

Neste item são apresentadas as avaliações sobre a influência do processo de compactação, nas energias intermediária e modificada, nas propriedades de granulometria e forma dos agregados reciclados de RCC, fazendo-se uma comparação com a granulometria do material original.

- Granulometria

A Figura 4.6 apresenta as curvas granulométricas das amostras 1 a 5, respectivamente, do agregado reciclado de RCC, considerando o agregado de resíduo em sua condição original, após a compactação na umidade ótima e após a compactação no final do ensaio, em ambas as energias. Apenas no caso da amostra 4, não foi possível realizar o ensaio de compactação com energia modificada devido a falta de material, conforme mencionado no item 3.2.1.7.

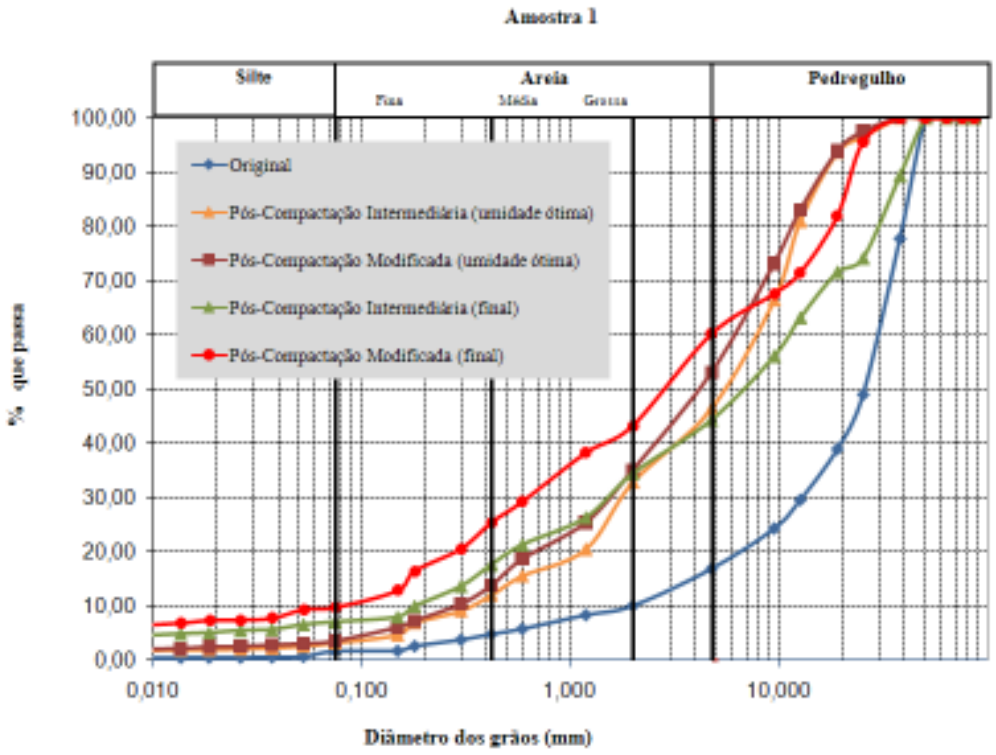

Figura 4.6 – Curvas granulométricas original e pós compactação, na umidade ótima e ao final do ensaio, com energias intermediária e modificada das amostras estudadas.

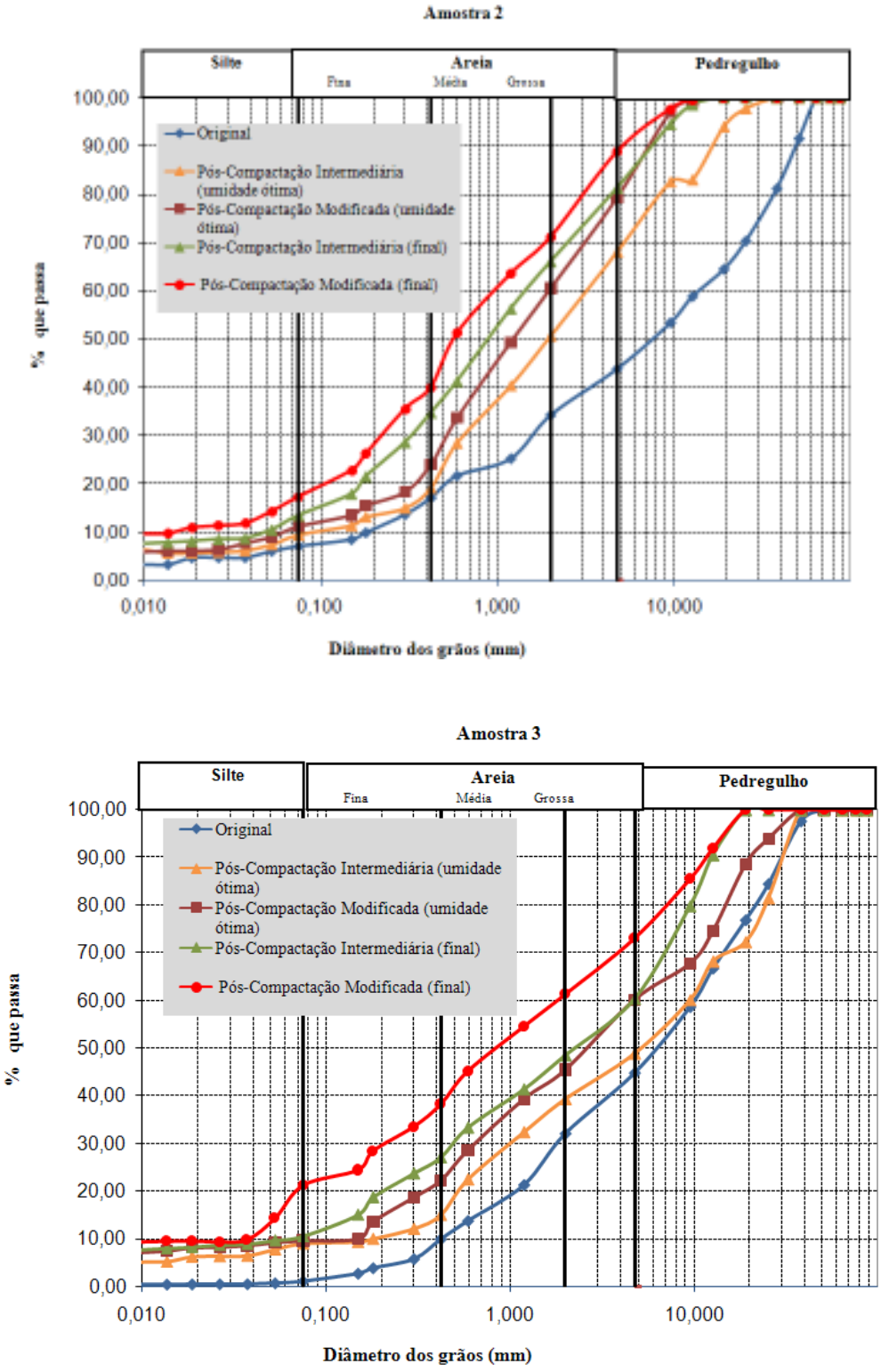

Figura 4.6 – Curvas granulométricas original e pós compactação, na umidade ótima e ao final do ensaio, com energias intermediária e modificada das amostras estudadas (continuação).

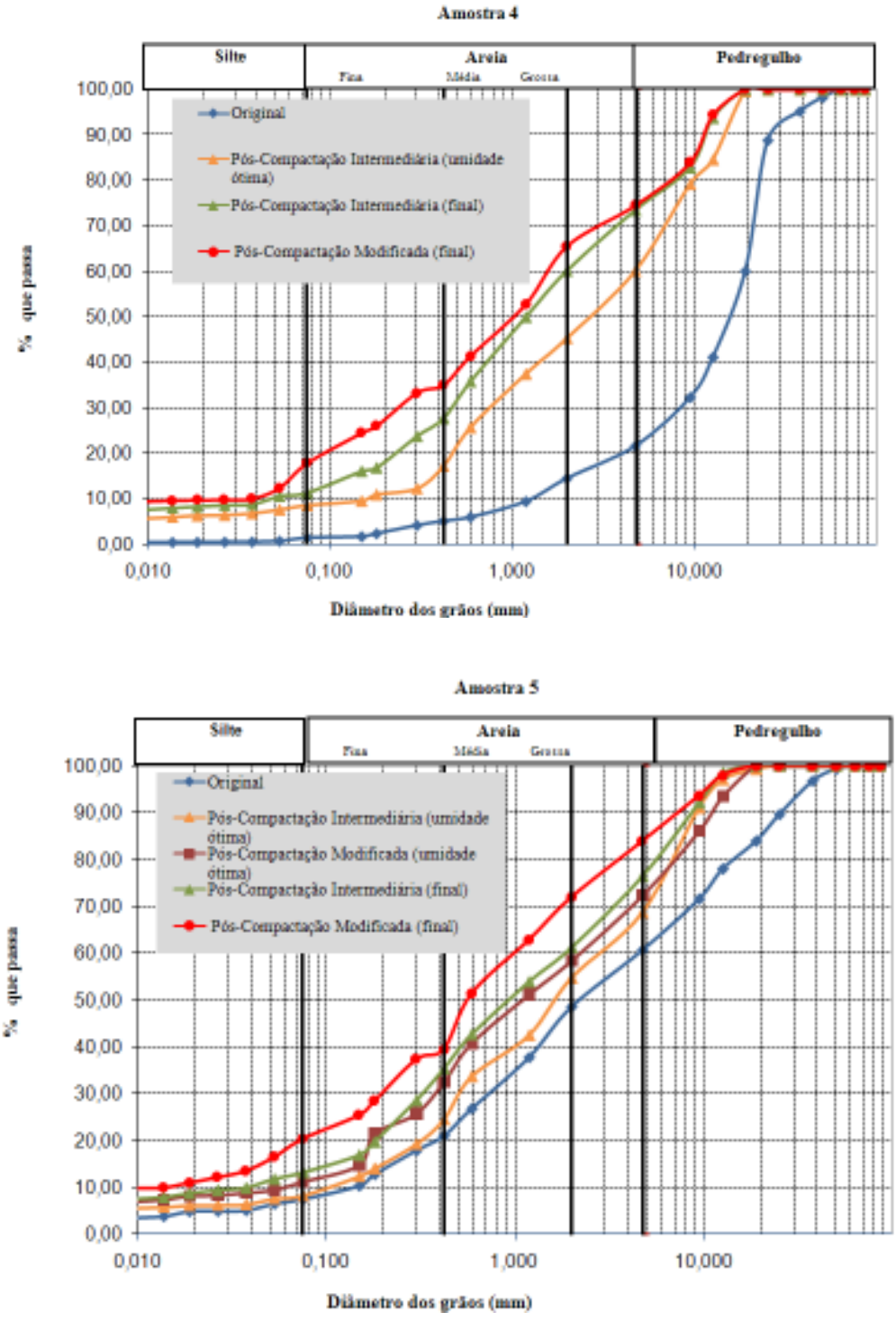

Figura 4.6 – Curvas granulométricas original e pós compactação, na umidade ótima e ao final do ensaio, com energias intermediária e modificada das amostras estudadas (continuação).

De acordo com a Figura 4.6, observa-se que o processo de compactação causa quebra nas partículas dos agregados e ainda que, quanto maior a energia, maior a intensidade desta quebra, ou seja, houve variação/alteração na curva granulométrica, fato verificado nas amostras originais, após a compactação na umidade ótima e ao final da compactação. Tal mecanismo provoca mudança na granulometria das amostras de RCC indicando, no caso das amostras 1 e 4, que o material apresentava-se mal graduado e passou a ser bem graduado. Para as amostras 2, 3 e 5, já possuía uma granulometria bem graduada, ou seja, $C_u > 15$ (CAPUTO, 1988).

Os resultados obtidos nesta pesquisa são semelhantes, como por exemplo, na variação da granulometria comparada com autores como Motta (2005), Leite (2007) Grubba (2009) e Lira Jr. (2010).

A Tabela 4.9 apresenta as mudanças na granulometria depois da compactação, cujas amostras de agregado reciclado permanecem dentro dos limites da NBR 15115 (ABNT, 2004), quanto ao diâmetro máximo dos grãos (63,5 mm), ao percentual passante na peneira 0,42 mm e aos coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c).

Ainda nesta tabela, verifica-se que as amostras originais 1 e 4 ficaram fora da faixa de valores de percentual passante na peneira 0,42 mm, como também, o coeficiente de uniformidade. Tais parâmetros, entretanto, passaram a atender às especificações da NBR 15115 (ABNT, 2004) nas amostras após as compactações, nas energias intermediária e modificada.

Tabela 4.9 – Comparação dos parâmetros da curva granulométrica antes e após a compactação.

Referência	Parâmetros	Amostras				
		1	2	3	4	5
Original	Percentual passante # 0,42 mm (%)	4,7	17,1	10,0	5,1	20,9
	C_u	8,0	42,3	21,5	9,6	31,9
	C_c	2,0	1,0	0,5	2,4	2,0
Pós-intermediária - Na umidade ótima	Percentual passante # 0,42 mm (%)	11,9	19,2	15,0	17,1	24,5
	C_u	22,7	31,9	31,7	26,4	31,9
	C_c	1,0	2,0	1,4	1,7	0,5
Pós-modificada - Na umidade ótima	Percentual passante # 0,42 mm (%)	13,7	24,0	22,2	--	32,5
	C_u	31,7	26,7	26,4	--	63,5
	C_c	1,4	2,3	1,7	--	0,5
Pós-intermediária - Final	Percentual passante # 0,42 mm (%)	17,6	34,7	27,0	27,6	35,4
	C_u	42,3	37,9	31,9	37,9	37,9
	C_c	1,0	1,7	2,0	3,3	1,7
Pós-modificada - Final	Percentual passante # 0,42 mm (%)	25,4	40,1	38,3	35,0	39,5
	C_u	31,9	45,1	37,9	37,9	63,8
	C_c	2,0	2,9	13,4	0,9	4,1
NBR 15115 (ABNT, 2004)	Percentual passante # 0,42 mm (%)	$10 \leq a \leq 40$				
	C_u	≥ 10				
	C_c	Não consta				

No caso da pesquisa realizada por Leite (2007) obteve-se valores de percentual de material passante na peneira 0,42 mm, inicialmente de 21,2% e, após a compactação modificada e intermediária (na aplicação de umidade ótima), os valores aumentaram, passando a 25% e 28%, respectivamente. Na amostra original identificou variação do coeficiente de uniformidade que passou de 53 para 43 e 74, energias intermediária e modificada, respectivamente; e quanto ao coeficiente de curvatura manteve-se o valor de 0,30 (LEITE, 2007).

Conforme verificado, a graduação das partículas dos agregados é modificada pelo efeito da compactação. Esta situação é bem visível durante o ensaio, pois em todas as peneiras a quantidade passante aumenta. Outro fator relevante é que a quantidade de finos que passam na peneira 0,075 mm aumentou bastante nas amostras após a compactação (na umidade ótima e ao final da compactação), com energia intermediária e modificada, conforme Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Percentual passante na peneira 0,075 mm nas amostras original e pós compactação (na umidade ótima e ao final).

Amostra	Percentual passante na # 0,075 mm (%)				
	Original	Pós compactação			
		Na umidade ótima		Ao final	
1	1,6	3,1	3,5	7,0	9,8
2	7,1	9,5	11,1	13,5	17,4
3	1,0	9,0	9,5	10,4	21,3
4	1,3	8,4	--	11,2	17,8
5	7,4	8,2	11,2	13,2	20,3

- Forma

A distribuição dos tipos de forma das partículas apresentados pelos agregados reciclados de RCC, com base na sua condição original (antes da compactação) e após o processo de compactação (final do ensaio), está indicada na Tabela 4.11.

Após a compactação, os agregados reciclados passam a ter um acréscimo da forma cúbica de 48,2 a 51,1% inicialmente, para, ao fim da compactação, 62,3 a 97,2% (intermediária) e 66,2 a 94,3% (modificada), enquanto, a quantidade da forma lamelar diminui discretamente variando de 27,8 a 30,5%, originalmente, para 1,3 a 37,7% (intermediária) e 3,0 a 31,7% (modificada). Para a amostra 5 tal variação ocorreu acentuada, provavelmente, devido a maior presença de materiais cerâmicos e mistos (tijolo + argamassa) do RCC. Já as partículas alongadas tiveram uma redução significativa de 18,3 a 21,8 para 0,0 a 5,5% (intermediária) e 0,0 a 2,7% (modificada); e no caso da forma alongada-lamelar deixa de existir quando o resíduo é compactado, em ambas as energias, conforme Tabela 4.13. Verifica-se que não houve diferenças significativas da distribuição das formas quando se compara energia modificada e intermediária. Assim sendo, não há um grande aumento de porcentagens entre estas, pois as primeiras quebras (alterações) são causadas pelos primeiros golpes. Há também o fato das partículas lamelares ainda persistirem, com valores acima do limite estabelecido, como o caso das amostras 4 (energia intermediária) e 2 (energia modificada), pela NBR 15115 (ABNT, 2004), mesmo com a aplicação dos golpes.

Tabela 4.11 – Forma das partículas dos agregados reciclados de RCC antes e após compactação.

RCC - Granulometria original (antes da compactação)				
Amostra	**Cubica %**	**Lamelar %**	**Alongada %**	**Alongada -Lamelar %**
1	48,2	30,2	18,3	3,3
2	45,2	29,6	21,8	3,3
3	48,7	30,1	19,9	1,3
4	49,3	30,5	18,7	1,4
5	51,1	27,8	18,9	2,1
RCC - após-compactação intermediária				
Amostra	**Cubica %**	**Lamelar %**	**Alongada %**	**Alongada -Lamelar %**
1	66,4	29,4	4,2	0,0
2	66,6	27,9	5,5	0,0
3	66,5	29,0	4,5	0,0
4	62,3	37,7	0,0	0,0
5	97,2	1,3	1,5	0,0
RCC - após-compactação modificada				
Amostra	**Cubica %**	**Lamelar %**	**Alongada %**	**Alongada -Lamelar %**
1	68,5	29,8	1,7	0,0
2	66,2	31,7	2,1	0,0
3	68,2	29,9	1,9	0,0
4	71,2	28,8	0,0	0,0
5	94,3	3,0	2,7	0,0

4.2 Ensaio mecânico

A verificação do comportamento mecânico do agregado reciclado de RCC foi realizada a partir do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC).

4.2.1 Índice de Suporte Califórnia

A Tabela 4.12 mostra os valores de CBR e expansão de cada amostra de RCC, em ambas as energias de compactação, com os valores médios e o desvio padrão.

Tabela 4.12 – Valores de ISC e expansão do material com aplicação de energias intermediária e modificada.

Energia	Amostras	Umidade média (%)	Parâmetros	Corpos de prova			Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
				A	B	C			
Intermediária	1	21,5	CBR (%)	105,3	87,7	92,6	95,2	9,1	9,55
			Expansão (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	2	20,3	CBR (%)	72,2	51,1	40,5	54,6	16,1	29,55
			Expansão (%)	1,8	0,0	0,9	0,9	0,9	100,00
	3	21,2	CBR (%)	32,9	88,8	66,5	62,7	28,1	44,86
			Expansão (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	4	18,1	CBR (%)	49,0	51,0	41,0	47,0	5,3	11,26
			Expansão (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	5	18,5	CBR (%)	49,8	53,5	59,9	54,4	5,1	9,40
			Expansão (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Modificada	1	18,1	CBR (%)	206,0	205,6	206,1	205,9	0,2	0,12
			Expansão (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	2	17,6	CBR (%)	91,0	76,2	79,7	82,3	7,8	9,42
			Expansão (%)	1,7	1,1	0,8	1,2	0,5	38,19
	3	18,0	CBR (%)	162,5	147,7	127,0	145,7	17,9	12,26
			Expansão (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	4	17,9	CBR (%)	108,8	115,4	113,4	112,5	3,4	3,03
			Expansão (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	5	17,7	CBR (%)	80,2	68,3	85,5	78,0	8,8	11,26
			Expansão (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Os valores médios do CBR nas energias intermediária e modificada variaram entre 47,0 a 95,2% e 78,0 a 205,9%, respectivamente. Tais resultados indicam que todos os agregados de RCC podem ser utilizados em vias de baixo volume de tráfego, aplicados em camadas de reforço do

subleito, sub-base e em camadas de base, neste último caso, exceto as amostras 2, 4 e 5, na energia intermediária. Tais valores atendem à especificação da NBR 15115 (ABNT 2004) que determina que para vias de baixo volume de tráfego o CBR deve ser superior a 60% para base, 20% para sub-base, e reforço de subleito 12%. No que se refere à expansão, as amostras apresentaram valor nulo, conforme recomenda-se a norma, exceto a amostra 2 (corpo de prova A para energia intermediária e todos os corpos de prova para a energia modificada).

É importante destacar que existe variação do valor de CBR, que é influenciado pela composição variável dos resíduos. Pode-se citar, por exemplo, no caso das amostras 1 e 4, as quais apresentam percentuais de concreto de 16,2 e 11,6%, respectivamente, forneceram valores em faixas diferentes de CBR, nas energias intermediárias e modificadas, 112,5 e 47%.

Outro fator verificado, é que na amostra 3, para ambas as energias, apresentou um desvio padrão alto (28,1%), indicando a variação dos resultados dos corpos de prova. Durante a execução dos ensaios, pode ocorrer situação que ocasione em alterações dos resultados, tal como, um agregado maior pode ficar embaixo do pistão, e assim a penetração será dificultada, implicando em valores altos de CBR.

Os resultados encontrados nesta pesquisa são semelhantes a algumas pesquisas realizadas, no que se refere ao atendimento de NBR 15115 (ABNT, 2004), tais como, Mendes *et al.* (2004), Fernandes (2004), Motta (2005), Leite (2007), Santos (2007) e Grubba (2009), citadas no item 2.6.4, para a aplicação em bases de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego.

A Figura 4.7 mostra as relações entre o CBR e o teor de materiais constituintes das amostras em sua condição original.

De acordo com a Figura 4.7, a presença de concreto e argamassa nos resíduos indica tendência de aumento dos valores do CBR, a exemplo das amostras 1, 3 e 4. Já a predominância de material miúdo ocasiona uma redução do CBR, a exemplo das amostras 2 e 5.

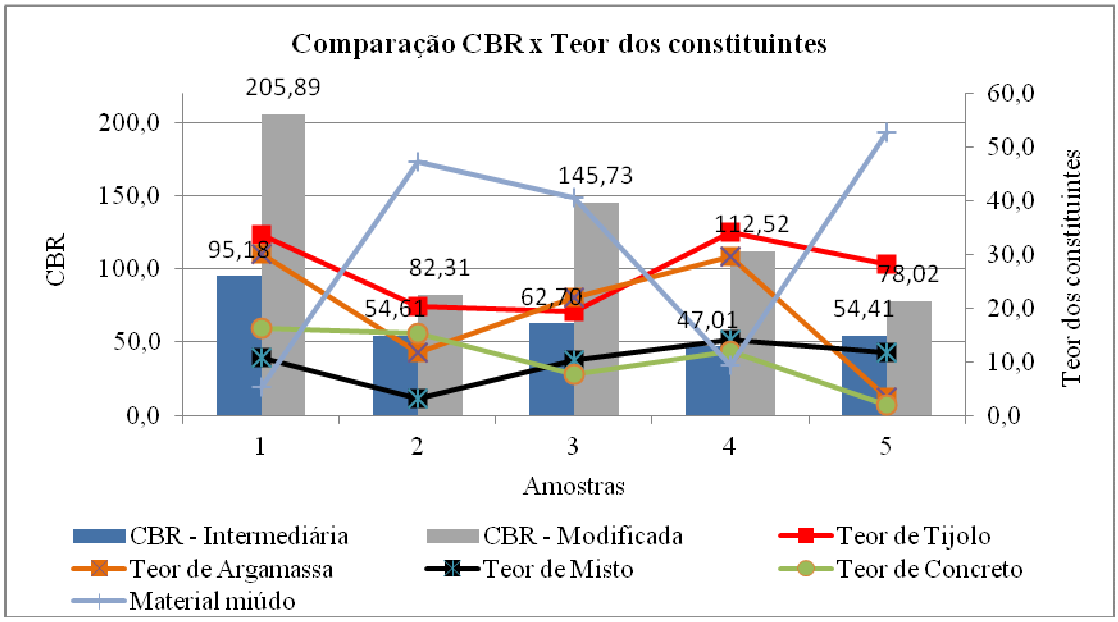

Figura 4.7 – Comparação teor dos constituintes com CBR na aplicação de energias intermediária e modificada.

Outro ponto a ser considerado, é que materiais com baixa resistência à aplicação dos golpes do ensaio de CBR, como tijolos, argamassa e material misto, tendem a se fragmentar e formar materiais miúdos que preenchem vazios, podendo ocasionar no aumento do resultado do ensaio.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 Conclusões

Os ensaios de caracterização física realizados nos agregados reciclados serviram para verificar se as propriedades atenderam às especificações da NBR 15115 (ABNT, 2004), sobre aplicação de agregados reciclados de RCC para fins de uso em pavimentação.

As amostras de resíduos da construção civil utilizadas nesta pesquisa, tipo brita corrida, apresentaram heterogeneidade na constituição, evidenciando uma variabilidade entre as amostras estudadas, sendo presentes os seguintes constituintes: concreto, argamassa, tijolo, material misto (tijolo + argamassa) e material miúdo, tendo sido classificadas como resíduos mistos (% de material cimentício inferior a 90%).

O teor de materiais indesejáveis apresentado nas amostras foi abaixo do limite de 3%, exceto para amostra 1, que teve um percentual de 3,9%. Para a utilização de agregados reciclados é fundamental que seja realizada uma boa segregação, para minimizar o teor de contaminantes.

Os resultados encontrados da massa específica das amostras coletadas dos agregados reciclados foram realizados em duas etapas: para o agregado passante na # 4,8 mm (material miúdo) e os retidos na # 4,8 mm (graúdos). Os valores encontrados de massa específica dos agregados miúdos variaram entre 2,6 e 2,8 kg/dm³, já os agregados graúdos apresentaram resultados médios variando entre 2,5 e 2,6 kg/dm³.

O teor de absorção de água das amostras de agregado reciclado indica valor na faixa de 10,5 a 16,4% do resíduo total. Para os ensaios em que se analisou este parâmetro por constituinte do resíduo, observou-se uma maior capacidade de absorção por material cerâmico (tijolo e misto).

A granulometria original dos resíduos é do tipo bem graduada para as amostras 2, 3 e 5, pois tiveram o valor do coeficiente de uniformidade acima de 10, e quanto as amostras 1 e 4 foram

classificadas como bem graduadas, após a compactação. No que se referem ao percentual passante na peneira 0,42 mm, todas atenderam à faixa estabelecida pela NBR 15115 (ABNT, 2004).

O índice de forma original das amostras apresentou percentual de grãos lamelar, nas amostras 1, 3 e 4, acima do limite estabelecido pela NBR 15115 (ABNT, 2004), assim como, em pesquisa realizada por Motta (2005) e Leite (2007). A forma cúbica era mais presente nos compostos cimentícios do agregado reciclado. Esta característica (forma cúbica) é bastante relevante na acomodação dos grãos, após a compactação do material.

Os resultados obtidos da influência do processo de compactação das amostras, com aplicação das energias intermediárias e modificadas nas amostras, apresentaram alteração nas propriedades físicas do agregado, como por exemplo, a granulometria e a forma das partículas. A compactação intermediária causou variação do tamanho dos grãos, onde a quebra continuou ocorrendo com a aplicação da energia modificada, causando um aumento do percentual de material passante na peneira 0,075 mm. Outro ponto notado foi que mesmo nas amostras que possuíam granulometria original mal graduada, após a compactação, passaram a bem graduada, possibilitando uma melhor estabilidade das camadas devido a maior interação entre os grãos. Assim sendo, não deve se limitar a análise da granulometria original dos agregados, visto que a aplicação das energias de compactação melhora a graduação do material.

Outro parâmetro afetado pela compactação é a forma das partículas do agregado, já que as principais alterações estão na diminuição da quantidade de forma lamelar e no aumento da forma cúbica. Assim sendo, a quebra das partículas ocorre com a aplicação dos primeiros golpes do processo de compactação, ou seja, na energia intermediária ocorrem as principais quebra das partículas. Outro fator que ocorre é que as partículas que, inicialmente, não estejam de acordo com a norma, após a compactação o material passa a atender à especificação.

Os resultados do ensaio mecânico de Índice de Suporte Califórnia apresentaram valores aceitáveis para aplicação em camadas de base vias de baixo volume de tráfego, exceto nas amostras 2, 4 e 5 que obtiveram especificação da NBR 15115 (ABNT, 2004) para aplicação em

camadas de sub-base e reforço de subleito. Para a maioria das amostras investigadas, os valores de expansão atenderam a norma.

Conclui-se nesta pesquisa que é viável o uso dos agregados reciclados estudados em vias de baixo volume de tráfego. Para tanto, a aplicação depende de um controle rigoroso no beneficiamento, execução dos serviços de pavimentação e, principalmente, deve ser realizada uma fiscalização para evitar o tráfego de veículos com pesos acima dos limites para estas vias, que causariam um desgaste excessivo e afundamento do pavimento.

5.2 Propostas de futuras pesquisas

- Criação de normas especificas de resíduos da construção civil para execução de ensaios e controle dos produtos oriundos destes materiais, além da avaliação das propriedades físicas e mecânicas do RCC;
- Analisar a viabilidade de aplicação de agregado reciclados de RCC da RMR;
- Avaliar o desempenho e vida útil de pavimentos utilizando agregados reciclados de RCC;
- Estudo da viabilidade econômica do uso de agregado reciclado em vias de baixo volume de tráfego, analisando o custo-benefício de sua aplicação;
- Analisar a influência de materiais de constituições diferentes no parâmetro CBR;
- Realizar ensaios de Módulo de resiliência em agregados de diferentes composições gravimétricas; e
- Definir um controle tecnológico do uso de agregados reciclados em vias de baixo volume de tráfego.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, F. J. de A. **Caracterização de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos.** 2005. 161f. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ALTERNATIVE MATERIALS IN ROAD CONSTRUCTION. 1999. **Literature Review –** Volume 1. Disponível em: <http://www.trl.co.uk/altmat/index.htm>. Acesso em: 18 mai. 2010.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados.** São Paulo: USP. 2000. 155f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** 2005. 168f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

ANGULO, S. C.; MIRANDA, L. F. R.; JOHN, V. M. Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil. In: SUSTAINABLE BUILDINGS 2002, 3., Oslo, 2002. **Anais...** Oslo: IISBE/GBC, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – **ABRELPE :** Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010. São Paulo. 202 f. 2010. Disponível em: <http://www.wtert.com.br/bhome2010/arquivo/noticias_eventos/Panorama2010.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023:** Informação e documentação: referências: documentação. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 6024:** Informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento escrito: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6954:** Lastro Padrão: determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 7181**: Solo – análise granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7182**: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15087:** Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

BARBOSA, A. H. Estudo da aplicação de resíduo cerâmico como substituto parcial do aglomerante e do agregado miúdo do concreto. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 51, 2009. **Anais...** Curitiba: IBRACON, 2009, 13f. CD-ROM.

BARBOSA JR. A. S. **Estudo da utilização de agregado reciclado em misturas de concreto de cimento portland para pavimentação.** Campinas: UNICAMP. 2008. 118f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas.

BASÍLIO, P. Órgãos públicos reciclam entulho - Reaproveitamento de resíduos de obras públicas gera economia na compra de materiais e na gestão de lixo urbano. **Infraestrutura urbana:** Projetos, custos e produção, São Paulo: Pinni, Ed 7, Out. 2011. Disponível em: <http://www.infraestruturaurbana.com.br/solucoes-tecnicas/7/artigo 235507-1.asp>. Acesso em: 14 ago. 2012.

BERNHOEFT, L. F. **Caracterização de propriedades físicas e mecânicas de argamassa com gesso reciclado.** Recife: 2010. 81f. Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco – UPE/POLI.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Materiais e estruturas de pavimentos asfálticos. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros – PROASFALTO - Programa Asfalto na Universidade. Rio de Janeiro: Petrobras e Abeda, 2006. 504 f. Disponível em: <http://www.proasfalto.com.br>. Acesso em: 15 ago. 2010.

BODI, J.; BRITO FILHO, J. A.; ALMEIDA, S. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., Cuiabá, 1995. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1995. p.409-436.

BRITO FILHO, J. 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.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregado graúdo reciclado – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** São Carlos: USP. 2003. Dissertação (Mestrado). Escola de engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo.

CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** São Carlos: USP. 2007. Dissertação (Mestrado). Escola de engenharia de São Carlos.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C; ALBERTE, E. P. V. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. **Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA / Caixa Econômica Federal, 2001. p. 190-227.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações.** 5° ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, 1977. 242 f.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações.** 6° ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234 f.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ação da atual situação dos resíduos da construção e demolição na cidade do Recife.** João Pessoa:UFPB, 2005. 131f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba.

CARNEIRO, F. P.; MELO, A. B. de; BARKOKÉBAS JR., B.; GUSMÃO, A. D.; DE SOUZA, P. C. M. *et al*. Os resíduos da construção civil na cidade do Recife. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 15, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABEPRO – Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2004. p. 5318-5325.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos da construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** São Paulo: USP, 2005. 129f. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CHINI, A. R.; KUO, S.; ARMAGHANI, J. M.; DUXBURY, J. P. Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track. **Journal of Transportation Engineering**. Reston, Virginia, v.127, n.6, p.486-492, 2001.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – **CNT**. Boletim Estatístico de Janeiro de 2011. Distrito Federal, 2012. Disponível em: < http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%C3%ADstico/ BoletimEstatistico.Jan.2011.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Brasília. 2002. **Resolução CONAMA nº 307**, 5 jul. 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/ port/conama/res/res02/res30702.html>. Acesso em: 14 abr. 2010.

_____. Brasília. 2011. **Resolução CONAMA nº 431**, 24 mai. 2011. Disponível em: <http://www.usp.br/fau/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0186/Profa._Fabiana/Conama_431_Gesso.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2011.

CORRÊA, M. R. S.; BUTTLER, A. M.; RAMALHO, M. A. Reciclagem de materiais de construção. **Téchne,** São Paulo, ed. 152, 2009.

COSTA, U.; URSELLA, P. Construction and demolition waste recycling in Italy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL IMPLICATIONS OF CONSTRUCTION WITH ALTERNATIVE MATERIALS – WASCON, 5., San Sebastián, 2003. **Anais...** San Sebástian: Inasmet, 2003. p.231-239.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER-ES 031/06**: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 032/05**: Pavimentos Flexíveis – Areia Asfalto a quente. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 033/05**: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico Reciclado a quente na usina. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 034/05**: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico Reciclado a quente no local. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 035/05**: Pavimentos flexíveis – Micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 047/04**: Pavimento Rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de pequeno porte. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 048/04**: Pavimento Rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-trilho. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 049/09**: Pavimento Rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-deslizante. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 056/04**: Pavimento Rígido - Sub-base de cimento de concreto Portland compactada com rolo. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 057/04**: Pavimento Rígido - Execução de sub-base melhorada com cimento. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 058/04**: Pavimento Rígido - Execução de sub-base de solo-cimento. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 059/04**: Pavimento Rígido - Pavimento de concreto de cimento Portland, compactado com rolo. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 065/04**: Pavimento Rígido - Sub-base de concreto de cimento Portland adensado por vibração. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 066/04**: Pavimento Rígido - Construção com peças pré-moldada de concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 067/04**: Pavimento Rígido - Reabilitação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 068/04**: Pavimento Rígido - Execução de camada superposta de concreto do tipo Whitetopping por meio mecânico. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 098/07**: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 112/09**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo "Terminal Blending". Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 114/09**: Pavimentação rodoviária - Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 115/09**: Pavimentação rodoviária - Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 137/10**: Pavimentação – Regularização do subleito. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 138/10**: Pavimentação – Reforço do subleito. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 139/10**: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 140/10**: Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 141/10**: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - ERRATA. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 142/10**: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 143/10**: Pavimentação – Base de solo-cimento. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 144/10**: Pavimentação asfáltica – Imprimação com ligante asfáltico convencional. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuais outros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 145/10**: Pavimentação – Pintura de ligação com ligante asfáltico convencional. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuais outros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 146/10**: Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Simples com ligante asfáltico convencional. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuais outros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 147/10**: Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Duplo com ligante asfáltico convencional. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/ downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 148/10**: Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Triplo com ligante asfáltico convencional. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/download coletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 149/10**: Pavimentação asfáltica – Macadame betuminoso com ligante asfáltico convencional por penetração. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuais outros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 150/10**: Pavimentação asfáltica – Lama asfáltica. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_ es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 151/10**: Pavimentação – Acostamentos. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/downloadcoletanea_ es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 152/10**: Pavimentação – Macadame hidráulico. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/download coletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 153/10**: Pavimentação asfáltica – Pré- misturado a frio com emulsão catiônica convencional. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/ normasmanuaisoutros/download coletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 154/10**: Pavimentação asfáltica – Recuperação de defeitos em pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuais outros/downloadcoletanea_es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

_____. – **DNER-ES 159/11**: Pavimentos asfálticos - Fresagem a frio. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuaisoutros/download coletanea_ es.html>. Acesso em: 17 ago. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de pavimentação.** 3ed. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimenta%C3%A7%C3%A3o_10.08.06.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2011.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas como contribuição para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo.** 2004. 204f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – **EMBRAPA**. Método para coleta de amostras de solos para análise. Distrito Federal, 2012. Disponível em: < http://www.cnps.embrapa.br/servicos/metodo_coleta.html>. Acesso em: 24 mar. 2012.

EMPRESA MUNICIPAL DE LIMPEZA E URBANIZAÇÃO – **EMLURB**. Serviços de pavimentação e manutenção na cidade de Recife. Recife, 2012. Disponível em: < http://www.recife.pe.gov.br/pr/servicospublicos/emlurb/pavimentacao.php>. Acesso em: 14 ago. 2012.

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

FIESP. Brasil 2022: planejar, construir, crescer. IN: Congresso Brasileiro da Construção - CONSTRUBUSINESS. 9. **Caderno técnico Construbussines 2010.** São Paulo: FIESP. 2010. 229f.

FONSECA, A. P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural.** Uberlândia: UFU, 2006. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Departamento de engenharia de estruturas.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de rochas na construção civil**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo, 2002.

FUCALE, S. P.; MEDEIROS JUNIOR, R. A.. Aplicação de Resíduos da Construção Civil em melhoramento de solos. **Construir Nordeste**, v. X, p. 1-2, 2009.

GARCIA, C. H. **Tabela para classificação do coeficiente de variação.** Piracicaba: IPEF, 1989. 12 p. (Circular técnica, 171).

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária.** 2009. 163f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

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

HENDRICKS, F.; JANSSEN, G. M. T. Reuse os construction and demolitions waste in the Nertherlands for road constructions. **Heron**, v. 46, n. 2, p. 109-117. 2001.

HOOD, R. S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos da construção e demolição com agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação.** 2006. 150f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design.** 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2004.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA – **IME.** Laboratório de ligantes e misturas betuminosas: Tipos de pavimento. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: < http://transportes.ime.eb.br/MATERIAL%20DE%20PESQUISA/LABOTATORIO/LAB %20LIGANTES/02_tipos_de_pavimento.ht>. Acesso em: 14 ago. 2012.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos da construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. 113f. Tese (Livre docência) – Escola Politécnics ds Universidade de São Paulo, São Paulo.

KOHLMAN RABBANI, E. R.; BARKOKÉBAS JR., B.; MARTINS, A. R. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Poli – UPE – **Termo de referência para elaboração de trabalhos acadêmicos.** 40f. Recife, 2009.

LEITE, F. da C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduos sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos.** 2007. 216f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos da construção e demolição.** Porto Alegre: UFRGS. 2001. 290f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEITE; M. B.; LIMA, P. R. L. Efeito da interação entre agregado graúdo, agregado miúdo e fator água-cimento sobre a resistência à compressão do concreto reciclado. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 51, 2009. **Anais...** Curitiba: IBRACON, 2009, 13p. CD-ROM.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho da construção Civil, para utilização como agregados para argamassas e concretos.** São Paulo: USP, 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 194f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 240f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

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

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de minérios**. 4 ed., Rio de Janeiro: CETEM-MCT, p. 168-207, 2004.

MACEDO, T. F**. Avaliação do uso de resíduos da construção e demolição com solo reforçado.** 2008. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil - Universidade de Pernambuco. Recife.

MARIANO, L. S. **Gerenciamento de resíduos da construção civil com reaproveitamento estrutural:** Estudo de caso de uma obra com 4.000 m². 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MARQUES NETO, J. da C. **Estudo da gestão municipal dos resíduos de construção e demolição na bacia hidrográfica do Turvo Grande.** São Paulo: USP, 2009. Tese (Doutorado). Escola de engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo.

MEDEIROS JR., R. A. **Aproveitamento de Agregado de Resíduo da Construção Civil (RCC) para uso em Obra de Melhoramento de Solos.** 2008. 83f. Trabalho de Iniciação científica. Graduação em Engenharia Civil - Universidade de Pernambuco. Recife.

MEDEIROS JR., R. A.; SUKAR, S. F.; GUSMÃO, A. D. Investigação Laboratorial do Uso de Resíduo da Construção Civil como Agregado Graúdo em Estaca de Compactação. **In:** XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Gramado.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997. 380p.

MENDES, T. A.; REZENDE, L. R.; OLIVEIRA, J. C.; GUIMARÃES, R. C., CARVALHO, J. C.; VEIGA, R. Parâmetros de uma pista experimental executada com entulho reciclado. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35., Rio de Janeiro, 2004. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 2004. 1 CD-ROM.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS):** Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos: 2008. Brasília: MCidades, 2010. 264p.

MIRANDA, L. F. R**. Estudos de fatores que influenciam na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado.** São Paulo: USP. 2000. 172f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de construção civil. São Paulo.

MONTEIRO, J.H.P.; FIGUEIREDO, C. E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A.F.; BRITO, J. C. X.; ALMEIDA, T. P. de; MANSUR, G. L.. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, IBAM, 2001. 195p.

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia:** subsídios para uma: gestão sustentável. Uberlândia: UFU. 2006. 201f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia.

MOREIRA, J. F.; DIAS, J. F.; REZENDE, M. E. B. Utilização de resíduos de construção e demolição em base de pavimentos na cidade de Uberlândia-MG. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 13., Maceió, 2006. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 2006. 1 CD-ROM.

MOTTA, R. dos S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduos sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** 2005. 160f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

NATAATMADJA, A.; TAN, Y. L. Resilient response of recycled concrete Road aggregates. **Journal of Transportation Engineering.** Reston, Virginia, v.127, n.5, p.450-453, 2001. Disponível em: <http://ascelibrary.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JTPEDI000127000005000450000001&idtype=cvips>. Acesso em: 05 de nov. 2006

MARQUES NETO, J. da C. **Gestão de resíduos de construção e demolição**. São Carlos: RiMa, 2005.

NÓBREGA, R. D. da; MELO, R. A. de. Uso de resíduos da construção civil na pavimentação urbana em João Pessoa. In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção,U1-013, 2009, Feira de Santana. **Anais...** Associação Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído, 2009, p.390-399.

OLIVEIRA, J. C. de. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis.** 2007. 190f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

PIANA, C. F. de B.; MACHADO, A.; de A.; SELAU, L. P. R. **Estatística Básica.** Versão Preliminar. Universidade Federal de Pelotas- Instituto de matemática e estatística. Pelotas, 2009. 221 f. Disponível em: <http://minerva.ufpel.edu.br/~markus.stein/Apostila_EB.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2012.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental.** São Paulo: USP/ESALQ, 1985, 467 p.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. Oficina de Textos. São Paulo, 2000.

PINTO, T. de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. 189f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PINTO, T. de P. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil:** A experiência do Sinduscon-SP. São Paulo: Sinduscon, 2005. 48p.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Estações de Reciclagem de Entulho – Visitas.** Disponível em: <http://portaldeservicos.pbh.gov.br/portalservicos/view/paginas/resultado PesquisaGeral.jsf>. Acesso em: 14 ago. 2012.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **PMSP/SP ETS-001:** Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil. Secretaria de Infra-estrutura Urbana, Especificação Técnica de Serviço, São Paulo, 2003.

RIBEIRO, F.; SERRA, N. G. S.; REZENDE, L. R.; GUIMARÃES, R. C. Utilização de entulho da construção civil em pavimentos flexíveis. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 11., Porto Alegre, 2002. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 2002. 1 CD-ROM.

RIBEIRO, M. Brasil ainda tem 87% das estradas sem pavimentação. **O Globo**, Rio de Janeiro, 17 de jul. 2010, site O Globo. Disponível em: < http://oglobo.globo.com/pais/mat/2011/07/16/brasil-ainda-tem-87-das-estradas-sem-pavimentacao-924921851.asp>. Acessado em: 11 ago. 2011.

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

ROSA, M. P. da. **Viabilidade econômico-financeira e benefícios ambientais da implantação de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil produzidos em Florianópolis-SC.** 2005. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina.

SANTOS, C. G dos. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** 2007. 169f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

SANI, D.; MORICONI, G.; FAVA G.; CORINALDESI, V. **Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates.** Waste Management. v. 25.177–182p. 2000.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. 2003. 130f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1ªed. São Paulo: Pini, 1997.
SILVA, C. A. R. da. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas.** 2009. 220f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas.

SILVA, T. A. A. da. O lugar da natureza e o esvaziamento da dimensão social na luta entre assentados rurais e o aterro sanitário de Igarassu – Pernambuco. **In:** V Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade (Anppas), Florianópolis, 2010.

SILVA, T. C. R. **Aplicação de Resíduos da Construção Civil como Material de Preenchimento em Estacas e Compactação.** 2009. 137f. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil - Universidade de Pernambuco. Recife.

SIQUEIRA, M. S de.; GUSMÃO, A. D.; SOUZA, P. C. M. Estudo Geotécnico sobre a Utilização de Resíduos de Construção e Demolição como Agregado Reciclado em Pavimentação. **In:** II Geojovem e a Mesa Redonda: Estabilização de Encostas na Região Serrana do Rio de Janeiro, 2006, Nova Friburgo. Estabilização de Encostas na Região Serrana do Rio de Janeiro, 2006.

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL – **SINAPI.** Relatórios de serviços: PCI.817.01 – Custo de composições - Sintético. Caixa Econômica Federal, Brasília, 2012. Disponível em: < http://downloads.caixa.gov.br/_arquivos/sinapi/relat_serv_jun_12/Servicos_MT_JUN12.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2012.

TOZZI, R. F. **Caracterização, avaliação e gerenciamento da geração de resíduos da construção civil (RCC) em duas obras no município de Curitiba/PR-Brasil.** 2006. 99 f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

TRICHÊS, G.; KRYCKYJ, P. R. Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., São José dos Campos, 1999. **Anais**. São Paulo: ABMS, 1999, p.259-265.

ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos da construção e demolição.** São Paulo, 2006. 200f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de minas e petróleo.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Porto Alegre: UFRGS, 2003 150 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VIEIRA, G. L.; MOLIN, D. C. C. D. Contribuição ao Estudo e Análise de Variabilidade da Utilização de Concretos como Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição, In: ANAIS DO II SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES: Novos Materiais e Tecnologias Emergentes. **Anais...** Porto Alegre. 2004.

WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Permanent deformation of granular materials and the shakedown concept. **Transportation Research Record**, Washington, n.1757, p.75-81, 2001.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** 1997. 140f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.