

FRANCIELE BORGES MIZUSAKI IYOMASA

**UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM CAMADAS DE PAVIMENTOS DE
TRÁFEGO LEVE: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE
AMERICANA**

**São Carlos
2013**

FRANCIELE BORGES MIZUSAKI IYOMASA

**UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM CAMADAS DE PAVIMENTOS DE
TRÁFEGO LEVE: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE
AMERICANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Marcos Antonio Garcia Ferreira

**São Carlos
2013**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

197ua

Iyomasa, Franciele Borges Mizusaki.

Utilização de agregados reciclados de resíduos da construção civil em camadas de pavimentos de tráfego leve : estudo de caso no município de Americana / Franciele Borges Mizusaki Iyomasa. -- São Carlos : UFSCar, 2014. 88 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2013.

1. Pavimentos. 2. Agregados. 3. Material reciclado. 4. Pavimentação. I. Título.

CDD: 625.8 (20ª)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana
C. P. 676 – 13.560-970 – São Carlos – SP
Fone/FAX: (16) 3351-8295
e-mail: ppgeu@ufscar.br home-page: www.ppgeu.ufscar.br



FOLHA DE APROVAÇÃO

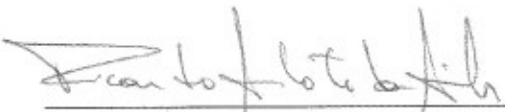
FRANCIELE BORGES MIZUSAKI IYOMASA

Dissertação defendida e aprovada em 20/11/2013
pela Comissão Julgadora

Prof. Dr. Marcos Antonio Garcia Ferreira
Orientador (PPGEU/UFSCar)


Prof.ª Dr.ª Maria Tereza Françoso
(DGT-FEC/UNICamp)


Prof. Dr. Marcelo de Castro Takeda
(DECiv/UFSCar)


Prof. Dr. Ricardo Siloto da Silva
Coordenador do CPG-EU

*À minha princesa
Sophia Aimi*

AGRADECIMENTOS

À *Deus*, em primeiro lugar, por iluminar meus pensamentos e abençoar meus caminhos

Ao meu professor e amigo *Prof. Dr. Marcelo C. Takeda*, pela oportunidade, ensinamentos, orientações, confiança e respeito. Obrigada por sempre acreditar em mim.

Ao *Prof. Dr. Marcos*, pelos ensinamentos e orientações. Agradeço oportunidade e a confiança.

Ao Laboratório de Infraestrutura de Transporte do Departamento de Engenharia de Transporte da Escola Politécnica da USP, por me permitirem usar o equipamento para realização dos ensaios triaxiais cíclicos, e em especial ao *Prof. Dr. Edson de Moura*, a *Prof^a. Dra. Liedi Légi B. Bernucci* e o técnico *Kendi*.

A *todos os professores* do Programa Pós-Graduação em Engenharia Urbana (PPGEU) da UFSCar, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos meus amigos e colegas de trabalho da Falcão Bauer pelo apoio e incentivos. Em especial a *Sra. Cristina Elaine*, *Sra. Kátia Paiva*, *Eng. Alvaro Gobatto*, *Dra. Vera L. Falcão Bauer Lourenço* e ao *Eng. Jocimar Souza Kuster Junior*.

Alguns agradecimentos especiais...

... ao meu esposo *Gilberto*, pela paciência, compreensão, carinho, força, apoio e amor. Obrigada por acreditar em mim.

...a minha princesa *Sophia*, um presente de Deus em nossas vidas. Obrigada filha pelo carinho, sorriso, alegria e amor

...a minha heroína, minha *mãe*, por todo ensinamentos, amor e incentivo na busca de um ideal

...aos meus irmãos, *Fabiano e Fernanda*, pelo amor, incentivo e ensinamento. Obrigada por fazer parte da minha vida.

*“Alguns homens vêem as coisas como são, e dizem ‘Por quê’?
Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo ‘Por que não?’” (George Bernard Shaw)*

RESUMO

As atividades rotineiras da construção civil têm a produção de resíduos como conseqüência, os quais representam problemas no gerenciamento das cidades, tanto pelo enorme volume produzido, quanto pelo descarte inadequado. Atualmente, estes resíduos sólidos da construção civil têm despertado interesse como fonte de material reciclado para a própria construção civil, principalmente como insumos de pavimentos urbanos, apresentando vantagens ambientais e econômicas para os municípios. Esta dissertação analisa a viabilidade econômica e técnica do emprego de agregados reciclados de resíduos da construção civil, mistos em camadas de base e sub-base de pavimentos de tráfego leve, gerados na região de Americana no estado de São Paulo. A pesquisa consiste em ensaios laboratoriais, dimensionamento de pavimento típico considerando o uso de materiais convencionais e reciclados e apresentação de valores estimados para execução das estruturas obtidas empregando nas camadas os materiais propostos. Propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados foram determinadas em laboratório por meio dos ensaios: caracterização dos constituintes dos reciclados, porcentagem de materiais indesejáveis, análise granulométrica, índice de forma, compactação, índice de suporte Califórnia e módulo de resiliência. Baseados nos resultados de Índice Suporte Califórnia dos materiais estudados e do padrão de brita graduada simples convencional foram dimensionadas estruturas de pavimentos para avaliar a viabilidade técnica e econômica. Os resultados mostraram que, quando o material reciclado é submetido a uma compactação adequada, os mesmos comportam-se tal qual uma brita graduada simples. Encontrou-se similaridade nas estruturas dimensionadas com os dois tipos de agregados. O custo final da execução de um dos pavimentos propostos apresentou-se 47% inferior com a utilização do reciclado, apesar da estrutura dimensionada com este material ter apresentado espessuras superiores.

ABSTRACT

Construction activities have, as a consequence, the production of by product. It represents several problems in the management of cities both by the large volume produced, as by its improper disposal. Nowadays, this construction and demolition waste has aroused interest as a source of recycled material for the own construction, such as inputs of urban pavements, which provides environmental and economic advantages for the cities. This dissertation analyses the economic and technical viability of the use of recycled aggregates from construction waste mixed in layers of base and sub-base light traffic pavements that were generated in the region of Americana in the state of São Paulo. The research involves laboratory tests, typical pavement dimensioning taking into account the use of conventional and recycled materials and the presentation of estimated values for the execution of structures that were obtained from the use of those materials. The physical and mechanical properties of the recycled aggregates were determined by means of laboratory tests: characterization of the constituents of recycled aggregates, percentage of unwanted materials, particle size analysis, shape index, compaction, California Bearing Ratio and resilient modulus. Based on the outcomes of the studied CBR materials and the pattern of conventional simple graded crushed rock, it was designed pavement structures to assess the technical and economic viability. The outcomes show that when the recycled materials are submitted to an appropriated compression, they act just like a simple graded crushed rock. It was found similarity in the sized structures with two kinds of aggregates. The final cost of the implementation in one of the proposed pavements was 47% less than with the use of recycled, despite the structure designed with this material have showed larger thicknesses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Quantidade de RCC coletados no ano de 2011 e 2012 (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2012).....	10
Figura 2.2:	Mapeamento das Recicladoras (ABRECON, 2011).....	14
Figura 2.3:	Comparativo granulométrico antes e após compactação do material USP (ABDOU e BERNUCCI, 2005).....	22
Figura 3.1:	Britador de Impacto (ROBERTS et al., 1996).....	30
Figura 3.2:	Usina de Reciclagem de RCC (Cemara Pró Ambiental Cemara Pró-ambiental, disponível em http://www.cemara.com.br/proambiental/).....	31
Figura 3.3:	Materiais estudados – (a) e (b) bica corrida reciclada de RCC mistos; (c) e (d) BGS reciclada de RCC mistos.....	32
Figura 3.4:	Ensaio de granulometria: (a) e (c) BGS reciclada de RCC mistos; (b) bica corrida reciclada de RCC mistos.....	36
Figura 3.5:	Ensaio de Compactação.....	37
Figura 3.6:	Ensaio de CBR: (a) amostra em imersão; (b) amostras após ensaio de penetração.....	38
Figura 3.7:	Equipamento Triaxial de Carga repetida do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.....	40
Figura 3.8:	Corpo de prova para ensaio Triaxial: (a) após compactação; (b) após cura; e (c) envolvidos por uma membrana de borracha antes do ensaio.....	41
Figura 3.9:	Curva de dimensionamento pelo CBR - método DNIT (Manual do DNIT, 2006).....	45
Figura 3.10:	Simbologia das inequações do cálculo das espessuras das camadas do pavimento flexível pelo método DNER (Manual do DNIT, 2006).....	46
Figura 4.1:	Porcentagem média dos constituintes do entulho da região de Americana	48
Figura 4.2:	Forma dos Grãos dos agregados reciclados da região de Americana.....	50
Figura 4.3:	Curva de compactação da amostra bica corrida reciclada da região de Americana.....	51
Figura 4.4:	Curva de compactação da amostra BGS reciclada da região de Americana....	52

Figura 4.5:	Curvas granulométricas antes e após a compactação da Bica Corrida reciclada de RCC da região de Americana.....	56
Figura 4.6:	Curvas granulométricas antes e após a compactação da BGS reciclada de RCC da região de Americana.....	57
Figura 4.7:	Representação gráfica da variação do módulo de resiliência da BGS reciclada em função do estado de tensão e do tempo de cura obtida a partir do modelo composto.....	62
Figura 4.8:	Representação gráfica da variação do módulo de resiliência da Bica reciclada em função do estado de tensão e do tempo de cura obtida a partir do modelo composto.....	63
Figura 4.9	Variação do módulo de resiliência da BGS reciclada com o período de cura para três pares de tensão.....	64
Figura 4.10:	Variação do módulo de resiliência da BGS reciclada com o período de cura para três pares de tensão.....	65
Figura 4.11:	Perfil do pavimento proposto tipo 1 utilizando a bica corrida reciclada na camada de sub-base e o BGS reciclado na base.....	67
Figura 4.12:	Perfil do pavimento proposto tipo 2 utilizando o BGS reciclado na base.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Geração estimada de RCC em alguns municípios paulistas (SINDUSCON-SP, 2005).....	8
Tabela 2.2:	Quantidade diária de Resíduos sólidos da construção civil pelos municípios no Brasil (ABRELPE, 2012).....	9
Tabela 2.3:	Porcentagem de RCC reutilizado ou reciclado em alguns países da União Européia (SYMONDS).....	12
Tabela 2.4:	Composição, em porcentagem, do entulho de diversas cidades brasileiras (FERNANDES, 2004).....	17
Tabela 2.5	Características do agregado reciclado para emprego em camadas de pavimentos conforme NBR 15115 (ABNT, 2004).....	20
Tabela 2.6:	Resultados ensaio do Índice de Suporte Califórnia agregados reciclados de RCC da Usina PMSP e USP (ABDOU E BERNUCCI, 2005)	22
Tabela 2.7:	Resultados dos agregados reciclados e brita (BGS) da região de Santo André e Itaquera (LEITE <i>et.al.</i> , 2005)	23
Tabela 2.8:	Modelos de módulo de resiliência de agregados reciclados de RCC encontrados por alguns autores.....	25
Tabela 2.9:	Resumo das deflexões características da pista experimental de Goiânia (OLIVEIRA, 2007).....	27
Tabela 3.1:	Classificação da forma dos grãos de acordo com NBR 6954 (ABNT, 1989).....	34
Tabela 3.2:	Especificações com relação à granulometria dos agregados reciclados.....	35
Tabela 3.3:	Sequência de tensões para primeiro estagio de condicionamento DNIT 134:2010	42
Tabela 3.4:	Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência DNIT 134:2010.....	42
Tabela 3.5:	Modelos avaliados na representação do MR dos agregados reciclados da região de Americana em função do estado de tensão DNIT 134:2010.....	43
Tabela 3.6:	Coeficiente de equivalência estrutural DNIT (2006).....	44
Tabela 4.1:	Resultado do ensaio de índice de forma dos agregados reciclados estudados.....	49

Tabela 4.2:	Valores encontrados nos ensaios de compactação com agregados reciclados mistos.....	52
Tabela 4.3:	Resultados dos ensaios Simultâneos de Compactação e CBR.....	53
Tabela 4.4:	Valores de CBR encontrados na bibliografia consultada.....	55
Tabela 4.5:	Resultados análise Granulométricas antes e após a compactação da Bica Corrida Reciclada de RCC da região de Americana.....	57
Tabela 4.6:	Resultados análise Granulométricas antes e após a compactação da BGS Reciclado da região de Americana.....	58
Tabela 4.7:	Resultados da modelagem do módulo de resiliência em função do estado de tensão para a BGS reciclada.....	61
Tabela 4.8:	Resultados da modelagem do módulo de resiliência em função do estado de tensão para a Bica corrida reciclada.....	61
Tabela 4.9:	Tabela de custos da Prefeitura de São Paulo de janeiro de 2013.....	69
Tabela 4.10:	Composição de preços da execução da camada de base de acordo com a Tabela de custos da Prefeitura de São Paulo de janeiro de 2013.....	70
Tabela 4.11:	Composição dos custos empregando agregados reciclados e convencionais na estrutura do pavimento tipo 1.....	71
Tabela 4.12:	Composição dos custos empregando agregados reciclados e convencionais na estrutura do pavimento tipo 2.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO- *American Association of State Highway Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

ARC - Agregados de Resíduos de Concreto

ARM - Agregados de Resíduos Mistos

BGS - Brita Graduada Simples

CBR - *California Bearing Ratio*

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

C_{nu} - Coeficiente de não Uniformidade

CUR - *Commissie voor Uitvoering van Research*

CEN - *European Committee of Standardization*

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

EUA - Estados Unidos da América

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ISC - Índice de Suporte Califórnia

LVDTs - *Linear Variable Differential Transformer*

PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo

RCC's - Resíduos de Construção Civil

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{nu} : coeficiente de não uniformidade;

d_{10} : diâmetro correspondente a 10% da porcentagem passante, em [mm];

d_{60} : diâmetro correspondente a 60% da porcentagem passante, em [mm];

MR: módulo de resiliência, em [MPa];

σ_d : é a tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$), em [MPa];

ε_1 ou ε_r : é a deformação resiliente axial (vertical) em [mm/mm];

Δh : é o deslocamento vertical máximo;

h_0 : é a altura inicial de referência do corpo de prova cilíndrico correspondente ao posicionamento do LVDTs;

R: Espessura do revestimento;

K_R : Coeficiente estrutural do revestimento;

B: espessura da base;

K_B : Coeficiente estrutural da base;

h_2 : Espessura da sub-base;

K_{SB} : Coeficiente estrutural da sub-base;

H_n : Espessura do reforço do subleito;

K_{ref} : Coeficiente estrutural do reforço do subleito;

H_m : Espessura total das camadas do pavimento;

K_{SB} : coeficiente de equivalência estrutural da sub-base, reforço e subleito de agregado reciclado;

CBR_{SB} : são os suportes da sub-base, reforço e subleito de agregado reciclado;

CBR_{SL} : são os suportes do subleito.

SUMÁRIO

RESUMO.....	IV
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVO	4
1.2.1 Objetivos Específicos	4
1.3 JUSTIFICATIVA	5
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
Capítulo 2 - SÍNTESE BIBLIOGRAFICA FUNDAMENTAL.....	7
2.1 NECESSIDADE SOCIOAMBIENTAL DE RECICLAGEM DOS RCC'S.....	7
2.2 RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	11
2.3 NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS	15
2.4 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS	16
2.5 PROCESSOS DE RECICLAGEM DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL	17
2.6 AGREGADOS RECICLADOS EM PAVIMENTAÇÃO.....	19
2.6.1 Experiências no Estado de São Paulo.....	20
2.6.2 Experiência de Belo Horizonte – MGθ	25
2.6.3 Experiência de Goiânia - GO.....	26
2.6.4 Experiências internacionais de Pavimentação com agregados reciclados.....	27
Capítulo 3 – MATERIAIS E METODOLOGIA.....	29
3.1 MATERIAIS E CONSTITUINTES	29
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO	33

3.2.1	Ensaio de Índice de Forma	33
3.2.2	Ensaio de Granulometria	34
3.2.3	Ensaio de Compactação Proctor	36
3.2.4	Ensaio de Índice Suporte Califórnia.....	37
3.2.5	Módulo de Resiliência	38
3.3	DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO.....	43
3.4	ESTUDO PARAMÉTRICO	47
Capítulo 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		48
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES DOS AGREGADOS RECICLADOS 48	
4.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO	49
4.2.1	Índice de Forma	49
4.2.2	Ensaio de Compactação.....	50
4.2.3	Ensaio de Índice Suporte Califórnia.....	53
4.2.4	Análise Granulométrica	55
4.2.5	Resultados dos ensaios de Módulo de resiliência.....	59
4.3	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS	65
4.4	ESTUDO PARAMÉTRICO	68
Capítulo 5 – CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES.....		73
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		77

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a intensa industrialização, crescimento populacional, migração das pessoas para as zonas urbanas e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos urbanos e industriais tornaram-se um grave problema no gerenciamento das cidades, tanto pelo enorme volume produzido, quanto pela disposição inadequada, que podem resultar em impactos ambientais, sociais e econômicos. Diante destes problemas a sociedade vem buscando um novo modelo de produção que concilie o desenvolvimento econômico com a redução dos resíduos gerados, e com a preservação dos recursos naturais, não apenas em benefício do presente, mas também das gerações futuras.

A cadeia produtiva da construção civil é um dos mais importantes setores das atividades econômicas no Brasil. O setor da construção civil, no Brasil, tem grande capacidade de movimentar a economia, gerar riquezas e empregos, sendo que, não depende da situação da economia mundial. Segundo Marques Neto (2005), entre os anos de 1980 e 1996, o setor foi responsável pela formação de aproximadamente 65% do investimento da economia brasileira e, em 1999, o setor alcançava 70% dos investimentos da economia brasileira. Em 2001, a construção civil foi responsável por 15,6% do PIB nacional, sendo que 6% a 9% representavam as edificações. Entretanto, observa-se que as atividades deste setor provocam significativos impactos ambientais, tanto pela quantidade de resíduos gerados, quanto pelo consumo de recursos naturais não renováveis.

Os resíduos de construção civil constituem a maior porção, em massa, dos resíduos sólidos gerados no mundo (RAO *et al.*,2007). Estima-se que sejam gerados a cada ano cerca de 68,5 milhões de toneladas no Brasil (ÂNGULO, 2005), 136 milhões nos EUA (EPA, 1998) e na União Européia 180 milhões (EUROPEAN COMMISSION, 2000). Além disso, o setor da construção civil é o maior consumidor individual de recursos naturais, estima-se que utiliza algo entre 20% e 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade (CARNEIRO *et al.*, 2001).

Segundo Pinto (1999), nas atividades de construção, reparos e demolição, muitas vezes por deficiência no processo construtivo, são gerados os entulhos, considerados subprodutos dos processos. Os custos desta irracionalidade estarão no aumento do custo final da construção, da remoção e tratamento de entulhos, e se agravam mais quando esses resíduos são dispostos clandestinamente em locais impróprios, como terrenos baldios, margens de rios e córregos, gerando problemas como enchentes, poluição visual, proliferação de vetores de doenças e substâncias tóxicas nos locais.

Assim, a indústria da construção civil passa por um período de desenvolvimento e implementação de tecnologias adequadas que visam a sustentabilidade nas construções das habitações e dos demais espaços de convívio humano, buscando reduzir os custos e os impactos gerados pelas atividades, ou seja, a redução, reutilização e reciclagem dos resíduos de construção civil, conhecidos também como RCCs.

Atualmente a reciclagem destes resíduos, vem se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade da construção civil, tanto pela diminuição dos impactos ambientais gerado pelo setor, como pela redução de custo administrativos do município com o gerenciamento destes entulhos. A reciclagem de RCCs apresenta-se também como alternativa interessante para construções de espaços habitacionais e infraestruturas de baixo custo.

O gerenciamento dos RCCs no Brasil está previsto na resolução nº 307 do CONAMA, aprovada em julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção. Esta resolução estabeleceu prazo de dezoito meses após janeiro/2003,

para que os municípios e o Distrito Federal desenvolvessem ações ambientalmente corretas com o trato dos resíduos sólidos da construção civil. Diante das penalidades, o artigo 10 desta resolução alerta que, os RCCs deverão ser reciclados ou reutilizados, na forma de agregados ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua reciclagem ou utilização futura (MARQUES NETO, 2005).

A resolução CONAMA 307 classifica os resíduos de origem mineral (rochas, concretos, solos, argamassa, cerâmicas etc.) como Classe A, e são geralmente considerados como inertes e pertencentes à classe IIB de resíduos sólidos urbanos, na classificação proposta na NBR 10004 (ABNT, 2004).

Dentre as possíveis alternativas de uso dos agregados reciclados de RCCs estudadas na atualidade, encontra-se a sua utilização em camadas de base e sub-base dos pavimentos urbanos. Este uso consome grandes quantidades de materiais e o resultado tem-se mostrado tecnicamente viável em várias cidades do Brasil (Ribeirão Preto, São Paulo, Belo Horizonte, dentre outras), demonstrando uma boa adequação à finalidade pretendida (ASSIS *et al.*, 2005; CARNEIRO *et al.*, 2001; GRUBBA, 200; RESPLANDES E REZENDE, 2007; RICCI, 2007).

Apesar das experiências anteriores indicarem resultados satisfatórios quanto ao emprego de agregados reciclados de RCCs no próprio setor da construção civil, é importante ressaltar que estes agregados reciclados possuem características físicas, químicas e mecânicas das proporções de cada um dos materiais do entulho britado em sua produção, e que são dependentes do nível de desenvolvimento da construção local, da diversidade de técnicas e metodologias de produção locais, assim como as matérias-primas disponíveis na região (CARNEIRO *et al.*, 2001). Assim, apesar das experiências anteriores indicarem resultados satisfatórios, é importante estudar o processo da reciclagem, a variabilidade e o desempenho dos agregados recicláveis particulares de uma localidade.

1.2 OBJETIVO

Esta pesquisa tem por objetivo geral avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização de agregados reciclados de resíduos da construção civil, gerados na região de Americana, em camadas de base e sub-base de pavimentos de tráfego leve em substituição ao agregado convencional.

1.2.1 Objetivos Específicos

Apresentar e qualificar o agregado reciclado de RCC misto proveniente da Usina de Reciclagem Cemara Pró-Ambiental de Americana, através da caracterização dos constituintes dos agregados reciclados, e ensaios de índice de forma e granulometria por peneiramento e sedimentação.

Determinar através dos ensaios laboratoriais as propriedades físicas e o comportamento mecânico, com e sem tempo de cura, dos agregados reciclados estudados. Pôde-se, a partir dos resultados de ensaios obtidos, verificar se os materiais estudados atendem os requisitos da norma NBR 15115:2004 (ABNT, 2004) para emprego em camada de pavimentos.

Dimensionar uma estrutura de pavimento típico, através do método empírico do DNER, considerando o uso dos materiais estudados e os convencionais.

Realizar um estudo paramétrico comparando as estruturas dimensionadas de pavimentos urbanos com agregados convencionais e recicladas da região de Americana, analisando a viabilidade técnica e econômica desta substituição.

1.3 JUSTIFICATIVA

O emprego de agregados reciclados de resíduos de construção civil na construção de camadas de pavimentos é uma das formas de reciclagem mais difundidas no Brasil, se mostrando tecnicamente viável, sendo usada como camada de base, sub-base, reforço do subleito ou revestimento primário, na forma de brita corrida, misturas de brita reciclada com solo, ou misturas de agregados reciclados com diferentes dimensões dos grãos.

No Brasil, mesmo com a publicação da resolução nº 307 do CONAMA, normas técnicas específicas, e as divulgações de experiências satisfatórias com emprego do agregado reciclado, muitos municípios ainda descartam os resíduos de construção civil em locais ilegais e aterros sanitários. Desconsiderando, dessa forma, o ideal no que se diz a respeito ao destino dos resíduos da construção civil, à reciclagem no presente ou descarte em aterros de maneira a viabilizá-los para futuras reciclagens. De acordo com Moreira *et al.* (2007), no ano 2007, havia apenas 16 (dezesesseis) usinas de reciclagem de resíduos da construção civil no Brasil.

Com a pesquisa espera-se estimular os municípios de médio porte a estudar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de usinas na região, assim como, a utilização dos agregados reciclados, quando possível, em substituição do material natural não-renovável, como a brita graduada ou materiais estabilizados com britas. Dessa forma, colaborar com a minimização dos impactos sócio-ambientais que o entulho causa, reduzindo os custos administrativos do município com a infraestrutura urbana, aterros sanitários e a remoção de resíduos de construção civil depositados clandestinamente em terrenos baldios, cursos d' água, encostas e ao longo de vias públicas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação de mestrado está organizada em seis capítulos. Primeiramente, o capítulo 1, *INTRODUÇÃO*, apresentava a questão da geração de resíduos nas diversas atividades da construção civil e a importância da reciclagem, além do objetivo e justificativa da pesquisa.

No capítulo 2, *REVISÃO BIBLIOGRÁFICA*, são expostos estudos que dão suporte ao trabalho, tais como processo de geração e reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil, obtenção do agregado reciclado, suas particularidades e seus possíveis empregos e pesquisas realizadas com o emprego em camadas de pavimentos. A revisão bibliográfica também apresenta as normas técnicas que regulamentam o emprego do agregado reciclado em camadas de pavimentos de tráfego leve e a resolução CONAMA nº 307 (CONAMA, 2002).

Na sequência, o capítulo 3 apresenta os *MATERIAIS E MÉTODOS*. Neste capítulo são descritos os materiais estudados e a metodologia de caracterização dos componentes, o programa experimental de laboratório, e os métodos utilizados no dimensionamento do pavimento e no estudo paramétrico.

O capítulo 4 compreende *APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS* dos ensaios realizados em laboratório, estruturas dimensionadas de pavimentos propostos e estudo paramétrico do emprego do agregado reciclado em substituição do convencional. Neste capítulo, foram verificadas as concordâncias dos resultados obtidos de ensaios com os estabelecidos na norma NBR 15115 (ABNT, 2004). São apresentados e discutidos os resultados dos ensaios mecânicos com agregados reciclados, analisando possível ganho de resistência com o tempo de cura. Este capítulo compreende ainda a apresentação das estruturas de dois tipos de pavimentos considerando no dimensionamento de cada um o emprego de agregados reciclados e convencionais, além de apresentar a produção diária da recicladora e os custos dos dois tipos de agregados avaliando a viabilidade econômica.

Finalizando este trabalho, o capítulo 5, *CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES*, conclui sobre os resultados dos ensaios laboratoriais e do estudo da viabilidade econômica, além de apresentar recomendações da aplicação do agregado da reciclados em camadas de pavimentos urbanos.

2.1 NECESSIDADE SOCIOAMBIENTAL DE RECICLAGEM DOS RCC'S

Com o avanço do conhecimento, a sociedade reconheceu, por diversas razões, a importância de conservar os recursos naturais, em especial por problemas de saúde e sociais, advindos de sua utilização e descarte inadequado. Assim, surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável que busca conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação dos recursos naturais, não apenas em benefício do presente, mas também das gerações futuras (SJÖSTROM, 1996).

A maior porção em massa dos resíduos gerados no mundo é constituída por resíduos gerados nas atividades da construção civil (RAO et al., 2007). Estimativas realizadas em 1994 apontavam que a geração mundial anual de resíduos da construção civil era compreendida entre 2 e 3 bilhões de toneladas (LAURITZEN, 1994).

De acordo com o relatório “*Management of Construction and Demolition Waste*” publicado pela Comissão Europeia, em 2000 a União Europeia produzia nas atividades da construção civil cerca de 180 milhões de toneladas de resíduos anualmente (EUROPEAN COMMISSION, 2000).

Nos Estados Unidos, os levantamentos no ano de 1996 indicaram que foram gerados no país cerca de 135,5 milhões de toneladas de resíduos de construção civil, sendo que, 35% a 45% deste montante foram destinados a aterros sanitários legais e aproximadamente 20% a 30%

reutilizados ou reciclados (EPA, 1998). Em Hong-kong no ano de 2004 foram produzidas mais de 20 milhões de tonelada de resíduos de construção civil (POON ET AL, 2006).

O macro complexo da construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas. Estima-se que utiliza algo entre 20% e 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade (CARNEIRO *et al*, 2001). Por outro lado, estima-se que os RCC's correspondem aproximadamente 100 milhões de toneladas por ano (MEIRELLES, 2012). Com a intensificação dos processos de urbanização a quantidade de entulhos reciclados (RCC) é cada vez mais elevada.

De acordo com Bernucci *et. al.* (2007), em São Paulo são dispostas cerca de 16 mil toneladas de entulho por dia. O setor da Construção civil no Estado de São Paulo é considerado como o principal gerador de resíduos sólidos urbanos. A Tabela 2.1 apresenta a quantidade de RCC produzidos e a participação em relação ao total de resíduos urbanos em alguns municípios do Estado de São Paulo.

Tabela 2.1 - Geração estimada de RCC em alguns municípios paulistas

Município	Ano de Referência	Geração Diária (ton)	RCC/RSU (%)
São Paulo	2003	17.340	55
Campinas	1996	1.800	64
Guarulhos	2001	1.308	50
Ribeirão Preto	1995	1.023	70
Santo André	1997	1.013	54
São José dos Campos	1995	733	67
São José do Rio Preto	1997	687	58

Fonte: SINDUSCON-SP (2005)

Todos os municípios paulista citados na Tabela 01 apresentam mais de 50% da quantidade dos resíduos sólidos urbano de RCC.

Segundo dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, estudo realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), foram coletados em 2012 cerca de 35 milhões de toneladas de resíduos de construção civil, de obras sob

responsabilidade municipal e os lançados em logradouros públicos. Não existem informações oficiais sobre a quantidade de resíduos proveniente destas atividades no Brasil. Estima-se que os resíduos gerados nas atividades da construção civil representam metade dos resíduos sólidos urbanos gerados no país. A Tabela 2.2 apresenta as quantidades diárias de RCC coletados nos anos de 2011 e 2012 pelos municípios no Brasil.

Tabela 2.2 – Quantidade diária de Resíduos sólidos da construção civil pelos municípios no Brasil

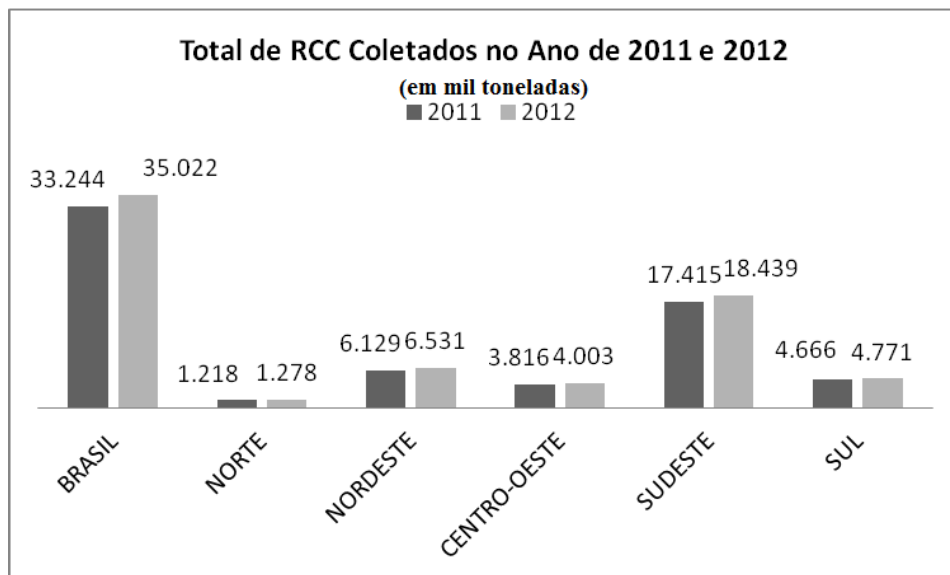
Região	RCC Coletado (t/dia) / Índice (Kg/hab./dia) 2011	RCC Coletado (t/dia) / Índice (Kg/hab./dia) 2012
Brasil	106.549 / 0,656	112.248 / 0,686
Norte	3.903 / 0,330	4.095 / 0,341
Nordeste	19.643 / 0,502	20.932 / 0,530
Centro - Oeste	12.231 / 0,966	12.829 / 1,00
Sudeste	55.817 / 0,742	59.100 / 0,780
Sul	14.955 / 0,638	15.292 / 0,648

Fonte: ABRELPE (2011 e 2012)

A Figura 2.1 apresenta as quantidades de Resíduos de Construção Civil coletados pelos municípios brasileiros no ano de 2011 e 2012. Os dados mostram que os municípios coletaram mais de 35 milhões de toneladas de RCC em 2012. A comparação entre os valores apresentados no ano de 2012 e 2011 mostra um aumento de mais de 5% na quantidade coletada. O aumento exige uma atenção especial quanto ao destino final desses RCC, visto que a quantidade total é ainda maior, uma vez que as quantidades apresentadas representam os resíduos coletados pelos municípios em obras públicas e os lançados em logradouros públicos.

Segundo Pinto (1999), nas atividades de construção, reparos e demolição, muitas vezes por deficiência no processo construtivo, são gerados os entulhos, considerados subprodutos dos processos. Os custos desta irracionalidade estarão no aumento do custo final da construção, na remoção e tratamento de entulhos, e se agravam mais quando esses resíduos são dispostos clandestinamente em locais impróprios, gerando problemas como enchentes, poluição visual, proliferação de vetores de doenças e substâncias tóxicas nos locais.

Figura 2.1 - Quantidade de RCC coletados no ano de 2011 e 2012



Fonte: ABRELPE (2011 e 2012)

A solução mais racional, quando se dispõe de tecnologias, é um sistema construtivo baseado em inovações tecnológicas de reciclagem e reutilização dos resíduos. Com a reciclagem de entulho de construção tem-se uma redução da poluição, do consumo de energia para extração de matérias-primas, da quantidade de resíduos, do número de aterros sanitários, das deposições de entulho em áreas irregulares, e, conseqüentemente, tem-se uma melhoria na qualidade de vida urbana. Além de colaborar para a preservação da natureza ao substituir a extração da matéria-prima, por material reciclável.

Segundo Ângulo (2005) e Vaz (1994), com o aproveitamento dos resíduos na reciclagem é possível produzir a partir destes agregados materiais para uso em: pavimentação; contenção de encostas; canalização de córregos; argamassas de assentamento e revestimento; concreto não estrutural; cascalhamento de estradas; reforço de aterros; preenchimentos de vazios em construções; e de valas de instalações. Segundo os autores, para todas as aplicações, é possível obter similaridade com o desempenho e qualidade dos materiais originais e com um custo competitivo.

2.2 RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

A aplicação em larga escala dos resíduos de demolição e construção ocorreu durante o período de reconstrução das cidades, após a Segunda Guerra Mundial, na Europa e no Japão. Neste período, era necessário realizar a limpeza das cidades e satisfazer a demanda de materiais para as novas construções e reformas, assim, reaproveitaram os entulhos de construção civil. Com esta aplicação dos RCC tiveram, além da limpeza da cidade, uma economia na aquisição de novos materiais (SCHULZ e HENDRICKS, 1992). Segundo VON STEIN (2000), neste período a Europa colocou como prioridade a reconstrução do sistema viário, o que levou a França e Alemanha serem pioneiras nos estudos e técnicas de reaproveitamento de RCC em camadas de pavimentação e na construção civil.

Nos países europeus, alguns fatores influenciam no sucesso da reciclagem destes resíduos, tais como a falta de recursos naturais, custo elevado de transporte de matéria-prima, a opinião pública europeia que possui uma conscientização da importância desta prática, sendo contra exploração de jazidas minerais e deposição de resíduos em aterro. Além disso, para estimular a reciclagem, o governo europeu promove programas para informar e educar a população (FHWA, 2004). A Tabela 2.3 apresenta a porcentagem de RCC reutilizado ou reciclado em alguns países da União Europeia.

Analisando-se a Tabela 2.3, verifica-se que as porcentagens de RCC reciclados diferem bastante nos países membros da União Europeia. De acordo com o relatório da Comissão Europeia “*Management of Construction and Demolition Waste*” (EUROPEAN COMMISSION, 2000), os métodos empregados na gestão dos resíduos de construção civil e os níveis de proteção ambiental são diferentes em alguns países da Europa, refletindo diretamente nas porcentagens de reciclagem.

Observa-se na Tabela 2.3, que a Holanda apresenta a maior porcentagem de reciclagem e reutilização de RCC da União Europeia. O governo da Holanda tem uma política que minimiza o uso de recursos naturais e promove a utilização de materiais reciclados (FHWA, 2000).

Tabela 2.3 – Porcentagem de RCC reutilizado ou reciclado em alguns países da União Européia

País	Taxa de Reciclagem/Reutilização de RCC (%)
Holanda	90
Bélgica	87
Dinamarca	81
Finlândia	45
Reino Unido	45
Áustria	41
Suécia	21
Alemanha	17
França	15
Itália	9
Espanha	<5
Grécia	<5
Portugal	<5
Irlanda	<5

Fonte: SYMONDS (1999)

Em novembro de 1991, foi instalada na cidade de São Paulo a primeira central de reciclagem de RCC's no Brasil, com capacidade de 100 t/h, localizada em Itatinga. Após dez anos, em 2001, a usina foi transferida para a o aterro de inertes de Itaquera (NUNES, 2004). Outras usinas de referências na gestão dos resíduos de construção foram as implantadas em Belo Horizonte. A prefeitura disponibiliza 3 (três) unidades de reciclagem de entulho, juntas, com capacidade nominal para reciclar aproximadamente 1.000 t/dia: Estoril iniciou em novembro de 1995; Pampulha implantada 1996; BR-040 em 2006 (CATAPRETA et. al, 2008).

No Brasil ocorreram alguns avanços quanto à gestão dos resíduos de construção civil, como a Resolução CONAMA nº 307, aprovada em julho de 2002, que determina diretrizes, procedimentos e critérios para a gestão destes resíduos, e as Normas Técnicas brasileiras, publicada 2004 pela ABNT, que estabelecem procedimentos e requisitos para a aplicação de agregados reciclados de RCC's na própria construção civil.

O gerenciamento dos resíduos e a utilização destes como agregados reciclados foram regulamentados em outros municipais, segue algumas leis e decretos: decreto nº 332 de 09 de

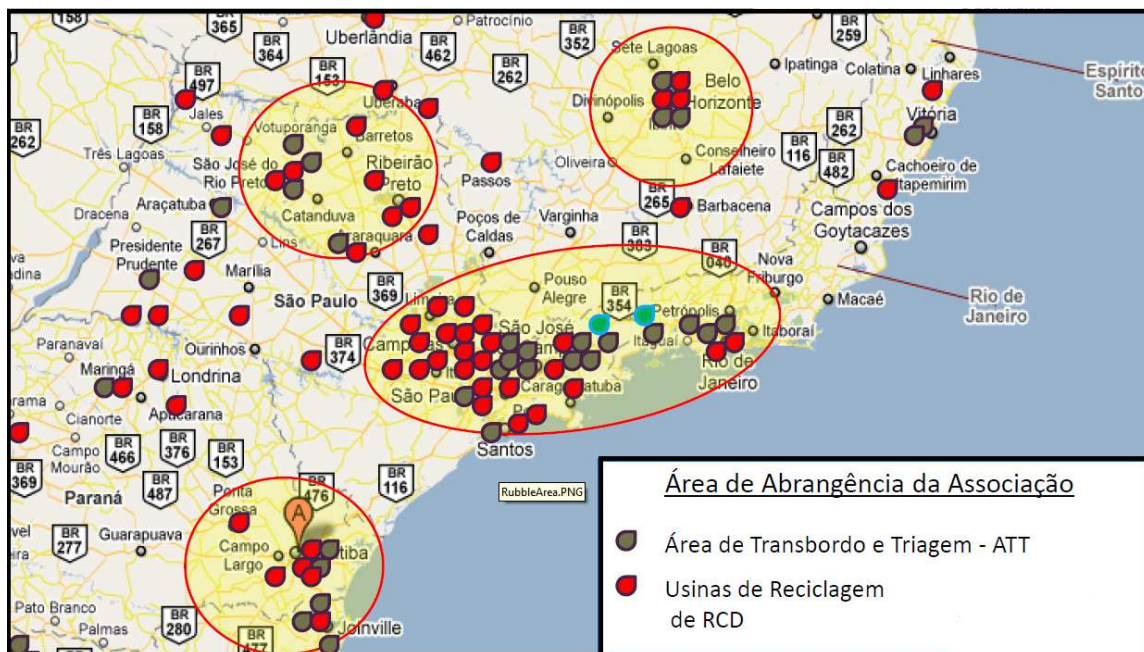
outubro de 2008 do município de Ribeirão Preto; Lei nº 6.126 de 27 abril de 2006 do município de Guarulhos - SP; Lei nº 6.352 (09/12/2005) do município de Araraquara; no município de Americana- SP foi publicada a Lei nº 4.198 (8/07/2005) e o decreto nº 7.730 (12/07/2008); Lei nº 5.159 de 24 de dezembro de 2004 no município de Joinville; no município de São José do Rio Preto a Lei nº 9.393 de 20 de dezembro de 2004 e o decreto nº 12.765 de 08 de abril de 2005 regulamenta a lei.

O decreto publicado em 2006, no Município de São Paulo, nº 48.075 (28/12/2006) regulamenta legislativamente sobre a obrigatoriedade do emprego de agregados reciclados de RCC em obras e serviços de pavimentação das vias públicas do Município de São Paulo. O decreto estabelece o prazo de 180 dias, contados da data da publicação, para contratações dos serviços de pavimentações das vias, e as alterações ou complementações nos projetos com as especificações técnicas que contemplem, em caráter preferencial, a utilização do agregado reciclado. Ficam dispensados o cumprimento do decreto as obras e serviços de pavimentação de vias com caráter emergencial para execução, quando o material reciclado apresentar características tecnicamente inexecutável, e ou quando não houver disponibilidade no mercado, de material beneficiado com características técnicas adequadas.

Em Janeiro de 2010, foi fundada a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição - ABRECON, reunindo 21 usinas de reciclagem, com o objetivo de estimular o mercado no país. Segundo um levantamento da entidade, em outubro de 2011, o país conta com cerca de 120 unidades do gênero em operação ou na fase de implementação, concentradas em sua maioria nas regiões metropolitanas de São Paulo, de Belo Horizonte, Curitiba e no norte Paulista, conforme é ilustrado na Figura 2.2. Considerando algumas ações isoladas de construtoras que adquiram equipamentos de britagem para suas obras, a ABRECON contabiliza em torno de 300 iniciativas voltadas à reciclagem de entulhos.

Segundo a ABRECON, cerca de 70% das usinas de reciclagem existentes estão concentradas na região Sudeste do país, sendo 80% delas operadas pelas prefeituras ou em regime de concessão para iniciativa privada, e apenas 20% é privada.

Figura 2.2 - Mapeamento das Recicladoras



Fonte: MEIRELLES, G. (2012)

Em 2 de agosto de 2010, foi editada a Lei nº 12.305, com o objetivo de reforçar as diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos sólidos, como os da construção civil. De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico em 2008 (IBGE, 2008), dos 5.564 municípios brasileiros, 50,8% descartam os resíduos sólidos em lixões, 22,5% em aterros controlados e 27,7% em aterros sanitários.

Segundo Ângulo (2005), no ano de 2005 estimava-se que eram gerados a cada ano cerca de 68,5 milhões de toneladas de RCC no Brasil. Atualmente, segundo levantamento da ABRECON, são produzidos 100 milhões de toneladas de resíduos da construção civil por ano (MEIRELLES, 2012). Dessa quantidade de resíduos gerados, de acordo com a ABRECON, são reciclados aproximadamente 10% em usinas moveis ou fixa.

O Estado de São Paulo tem capacidade de reciclar 800 mil toneladas mensais de resíduos da construção civil. Entretanto, são comercializadas cerca de 200 mil toneladas por mês. Através

do levantamento bibliográfico, observa-se que existe uma grande disponibilidade de RCC para reciclagem, o que viabiliza a utilização deste material em camadas de pavimentos urbanos, tanto pelo consumo de grandes quantidades de materiais em obras de pavimentação, como pela possibilidade da utilização da grande maioria dos componentes do entulho (ABRECON, 2012).

2.3 NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS

As especificações técnicas e as normas colaboram na difusão e consolidação da utilização do agregado reciclado de RCC como insumos na própria construção civil. Muitas pesquisas e estudos vêm sendo desenvolvidos em diversos países, visando estabelecer técnicas de gestão, reciclagem e aplicação dos resíduos da construção civil.

No Brasil, a primeira especificação técnica para emprego dos agregados reciclados em pavimentação foi publicada no ano de 2003 pela Prefeitura do Município de São Paulo. Após, no ano de 2004, foram publicadas as primeiras normas brasileiras relacionadas ao destino dos resíduos de construção, a reciclagem e a utilização dos agregados reciclados de RCC em algumas atividades da construção civil. A especificação e as normas nacionais são:

- a) Especificação Técnica da PMSP/SP ETS – 001/2003 – Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregados reciclados de resíduos sólidos da Construção Civil;
- b) ABNT NBR 15113:2004 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: Aterros: Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- c) ABNT NBR 15114:2004 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: Área de reciclagem: Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- d) ABNT NBR 15115:2004 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil; Execução de camadas de pavimentação; Procedimentos;
- e) ABNT NBR 15116:2004 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural: Requisitos.

2.4 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS

Segundo Luz *et. al.* (2002), os resíduos de construção e demolição são compostos por componentes minerais misturados com outros materiais como metais, restos de tintas e esmalte, gesso e madeira. Sendo assim, é necessária a separação do entulho para serem reutilizados. Com objetivo de estabelecer as diretrizes, os critérios e procedimentos para a gestão racional dos resíduos da construção civil, a resolução CONAMA 307, classifica os resíduos da seguinte forma, sendo as classes A e B os recicláveis:

- a) Classe A: composto de resíduos de origem mineral (rochas, concretos, solos, argamassa, cerâmicas etc.) que representando cerca de 90% da massa dos entulhos do Brasil;
- b) Classe B: resíduos não minerais destinados a outros empregos na reciclagem (papel, plásticos, metal, madeiras etc.);
- c) Classe C: resíduos que ainda não têm tecnologias ou aplicações a um custo viável para serem reciclados, materiais oriundos como o gesso;
- d) Classe D: resíduos perigosos (tintas, solventes) ou contaminados (construções de hospitais e outros).

Diante das penalidades, o artigo 10 desta resolução alerta sobre a forma de destino dos RCC's, que são:

- a) Classe A: deverão ser reciclados ou reutilizados, na forma de agregados ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua reciclagem ou utilização futura;
- b) Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a área para armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
- c) Classe C: deverão ser armazenados, transportados e reutilizados em conformidade com as técnicas específicas;

- d) Classe D: deverão ser armazenados, transportados e reutilizados em conformidade com as técnicas específicas;

Segundo Carneiro *et al.* (2001), a composição química dos entulhos gerados está condicionada às características da região, relacionada à composição de cada um dos seus componentes (parâmetros específicos da obra). Existem componentes minerais (concretos, argamassa e cerâmicas) e não minerais (plásticos, madeira, papel, metais e material orgânico), em países subdesenvolvidos como o Brasil, observam-se resíduos, na sua grande maioria, constituídos de argamassas, concretos e outros.

A pesquisa de Fernandes (2004) apresenta as porcentagens das frações de cada constituinte do entulho para diferentes cidades do Brasil. A Tabela 2.4 reproduz esta informação, indicando os valores para as cidades de São Carlos, São Paulo, Ribeirão Preto, Salvador e Rio de Janeiro.

Tabela 2.4 - Composição, em porcentagem, do entulho de diversas cidades brasileiras

Material	Origem					
	São Carlos	São Paulo	São Paulo	Ribeirão Preto	Salvador	Rio de Janeiro
Concreto e argamassa	69	12	33	59	53	66
Solo e areia	-	82	32	-	22	-
Cerâmica	29	3	30	23	14	12
Rochas	1	-	-	18	5	14
Outros	1	3	5	-	6	8

Fonte: FERNANDES (2004)

2.5 PROCESSOS DE RECICLAGEM DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Os resíduos de construção civil de origem mineral (cimentício e cerâmico) podem ser reaproveitados na própria obra. Como a reciclagem dentro da obra tem menos abrangência e volume, não exige equipamentos sofisticados. Em geral, pode ser utilizado um moinho de rolo para triturar o entulho. A principal vantagem de processar e reaproveitar os resíduos no próprio canteiro é financeiro, desta forma, a construtora reduz o custo do transporte e descarte destes

resíduos em aterros sanitários, e reaproveitando o agregado reciclado na obra em novas atividades da construção civil (LEAL, 2001).

O processo de reciclagem do entulho para a produção de agregados reciclados na usina compreende um conjunto de operações unitárias (LUZ *et.al.*,2002). Primeiramente realiza-se a separação dos diferentes componentes do entulho de construção por processo de catação manual ou separação magnética. Após a operação de separação dos constituintes dos RCC's, segue-se com a britagem, que consiste em reduzir as dimensões do material para adequar o tamanho dos grãos à sua finalidade (CHAVES, 1999).

Os grãos tornam-se mais resistentes à compressão, após a britagem, se comparados ao entulho bruto, uma vez que as fragmentações se dão no plano de menor resistência do resíduo. Com isso, formam-se os grãos menores, utilizados para o embricamento das partículas maiores. Após a britagem, os grãos são selecionados granulometricamente, passando-os por peneiras. A operação de peneiramento não ocorre no processo de reciclagem nos casos em que haja interesse por material sem classificação granulométrica, comumente denominada brita corrida reciclada.

O agregado reciclado de RCC's é uma mistura de agregados graúdos e miúdos, gerados por processo de britagem em usinas. O coeficiente de forma do agregado reciclado é similar ao do agregado natural de rocha calcária, apresentando uma forma mais irregular, e textura mais áspera e porosa. Os agregados reciclados RCC's são mais porosos que os naturais, o que implica em uma absorção de água mais elevada. Por outro lado, estes resíduos apresentam componentes com algumas propriedades relevantes para o desempenho de materiais de construção como partículas não-inertizadas, que ainda reagirão com partículas de Ca que estarão disponíveis para novas reações. Segundo CARNEIRO *et. al* (2001), do ponto de vista geotécnico, os agregados reciclados apresentam propriedades interessantes para utilização na construção de pavimentos, tais como: material não plástico e expansibilidade baixa ou nula.

2.6 AGREGADOS RECICLADOS EM PAVIMENTAÇÃO

No Brasil, a reciclagem da fração mineral do RCC's é mais utilizada em pavimentação e como material de enchimento para aterros. O emprego em produto à base de cimento, como o concreto e argamassa, é menor. Na pavimentação os agregados de RCC's podem ser empregados nas camadas de base, sub-base, reforço do subleito e no cascalhamento de vias, substituindo os agregados convencionais. Segundo Leite (2005) o material convencional é responsável por grandes impactos ambientais, consumindo cerca de 30% do mercado brasileiro de pedra britada.

Várias são as vantagens desta aplicação apresentadas por diferentes pesquisadores (CARNEIRO *et al.*, 2001, FERNANDES, 2004, JOHN, 2001e PINTO, 1999) dentre elas: a simplicidade dos processos de construção dos pavimentos e da produção dos agregados reciclados; o consumo de grandes quantidades de materiais em obras de pavimentação; a utilização das diversas frações granulométricas do material reciclado; a possibilidade da utilização da grande maioria dos componentes do entulho (argamassa, concreto, areias, pedras, materiais cerâmicos); a redução do consumo de energia necessária para a reciclagem com o uso da fração graúda; a diminuição do custo de pavimentação, uma vez que o custo de agregados de RCC é menor; o agregado apresenta expansibilidade baixa ou nula; a economia de jazidas minerais; vantagens ambientais, econômica e sociais para município.

Pela consulta bibliográfica, observou-se que muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas no Brasil e em outros países, procurando estabelecer diretrizes para a reciclagem dos resíduos gerados nas atividades de construção civil. Os resultados apontam de uma forma geral que o agregado reciclado de RCC's possui viabilidade técnica para seu emprego em pavimentação, proporcionando a sociedade benefícios ambientais e econômicos.

A Associação Brasileira Normas Técnicas – ABNT publicou em 2004 normas que estabelecem procedimentos e requisitos, para a aplicação de agregados reciclados de RCC's em camadas de pavimentos urbanos: NBR 15115 procedimentos para execução de camadas de pavimentação; NBR 15116 de requisitos para utilização em pavimentação e preparo de concreto

sem função estrutural. As características estabelecidas pela norma para os agregados reciclados de RCC's em pavimentação são apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Características do agregado reciclado para emprego em camadas de pavimentos conforme NBR 15115

Ensaio	Detalhamento	
Análise granulométrica	Dimensão características máximas 63,5 mm	
	Coeficiente de não uniformidade maior ou igual a 10	
	% passante na peneira 0,42 mm entre 10% e 40%	
Porcentagem de materiais indesejáveis	de mesmo grupo - 2,0 %	
	de grupos distintos - 3,0 %	
Forma dos grãos	% de grãos lamelares máximo 30%	
Índice de suporte Califórnia (CBR)	de acordo com o tipo de camada	(*) Base 60%
		Sub-base 20%
		Reforço de subleito 12%
		Base 0,5 %
Expansão	de acordo com o tipo de camada	Sub-base 1,0 %
		Reforço de subleito 1,0 %

(*) É permitida a utilização de agregados reciclados de RCC's em camada de base para vias de tráfego com $N = 10^6$ repetições do eixo padrão de 80 KN no período do projeto.

O município de São Paulo dispõe de uma especificação para o uso de agregados reciclados (PMSP/SP – 001/2003) em camadas de reforço do subleito, sub-base ou base mista de pavimentos. As especificações das duas normas, NBR 15115 (ABNT, 2004), apresentada na Tabela 2.5, e PMSP/SP ETS – 001 (PMSP, 2003) difere com relação à granulometria. A NBR especifica a dimensão característica máxima de 63,5 mm e, na peneira 0,42 mm a porcentagem entre 10% a 40%, enquanto PMSP, a porcentagem que passa na peneira 0,42 mm, deverá ficar entre 10 e 30%.

2.6.1 Experiências no Estado de São Paulo

Desde a década de 80, o Brasil vem realizando experiências de aplicação dos agregados de resíduos sólidos de construção e demolição como material de pavimentação, porém sem monitoramento periódico e estudos sistemáticos. A primeira usina recicladora foi instalada no início da década de 90, pela Prefeitura do Município de São Paulo - PMSP.

Fernandes (2004) observou em sua pesquisa que a composição do agregado reciclado influencia significativamente no valor dos ensaios de módulo de resiliência, apresentando valores maiores nos agregados reciclados resíduos de concreto.

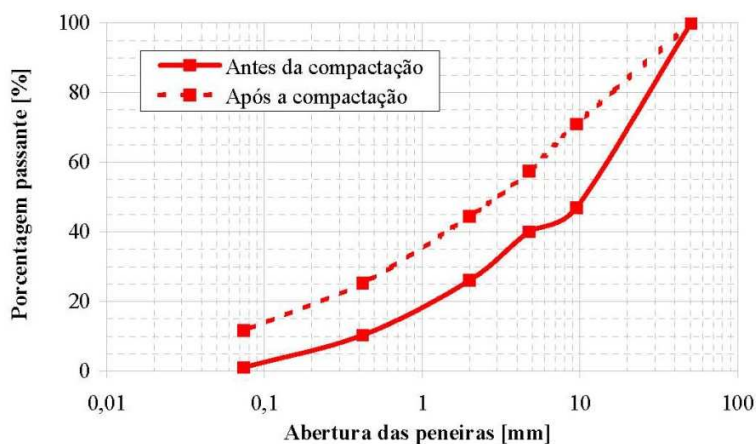
Um projeto inovador de Pavimento Ecológico foi iniciado no final de 2004, com a pavimentação do sistema viário do novo Campus da USP – Leste, utilizando materiais reciclados em toda sua estrutura. Nas camadas de base e sub-base foram feitas com agregados reciclados de RCC's, e seu revestimento foi executado com asfalto modificado com borracha moída de pneu (asfalto-borracha). Os resíduos utilizados na pesquisa foram oriundos da usina de reciclagem da Prefeitura Municipal de São Paulo e do canteiro de obra da USP – Leste (ABDOU e BERNUCCI, 2005).

Os pesquisadores Abdou e Bernucci, 2005 apresentaram as porcentagens dos RCC's estudados da usina de reciclagem da Prefeitura Municipal de São Paulo compostos por 42% de concreto e argamassa, 24% de brita, 8% de materiais cerâmicos, menos de 0,5% de amianto, 26% de material fino (passante na peneira 4,76 mm), e aproximadamente 0,4% a proporção de materiais indesejáveis. Os RCC's do canteiro de obra da USP – Leste aproximadamente 55% do material é concreto e argamassa, 16% de telhas e tijolos, 13% de pisos e azulejos, 12% de britas e 3% de materiais de amianto e outros.

Os agregados reciclados estudados no projeto, Pavimento Ecológico, satisfizeram a norma NBR 15115 (ABNT, 2004), na porcentagem que passa pela peneira nº 40 (0,42mm) entre 10% e 40%. Os dados obtidos das dimensões do agregado reciclado da USP – Leste apresentaram a forma cúbica em 64% dos grãos, e a forma lamelar em 34%, enquanto que os materiais da PMSP apontaram forma cúbica.

Estudando o efeito da compactação, observaram que o agregado reciclado é suscetível à quebra pelo processo de compactação. A Figura 2.3 apresenta as curvas granulométricas dos materiais antes e após a compactação do agregado reciclado.

Figura 2.3 - Comparativo granulométrico antes e após compactação do material USP



Fonte: ABDOU e BERNUCCI (2005)

Os resultados do ensaio de *Califórnia Bearing Ratio* (CBR ou Índice de Suporte Califórnia – CBR), realizado na pesquisa, encontram-se na Tabela 2.6. Os pesquisadores observaram nos resultados que, com aumento nos período de cura, o índice de suporte Califórnia mostrou um crescimento elevado, que pode ser explicado em função de um potencial pozolânico do agregado reciclado *in natura*, que com a compactação pode ter ativado através do aumento das quantidades de finos e com a adição de água, provocou a reação pozolânica com o tempo.

Tabela 2.6 - Resultados ensaio do Índice de Suporte Califórnia

Procedência	Tempo de cura (dias)	Índice de Suporte Califórnia (%)	Média do CBR (%)
Usina da PMSP	0	76	75
	0	74	
	28	87	94
	28	101	
	90	126	
	90	107	
USP - Leste	0	63	66
	0	60	
	0	64	
	7	65	

Fonte: ABDOU e BERNUCCI (2005)

Pesquisa realizada por Leite *et al.* (2005) avaliou e comparou os resultados obtidos de CBR para agregados reciclados provenientes das usinas de reciclagem de Santo André, Itaquera e

Usina Firpavi com brita graduada simples. Os materiais utilizados para os ensaios de CBR foram passante 100% na peneira 50 mm, da usina de Santo André, atendendo as recomendações da USP – Leste. O material da Itaquera apresentou passantes 100% na peneira 63,5 mm, como recomenda a NBR 15115 (ABNT, 2004). A Tabela 2.7 apresenta os valores obtidos de ensaios em laboratório, segundo LEITE *et. al.* (2005).

Comparando os resultados obtidos, Leite *et al.* (2005) verificaram que a energia de compactação influenciou diretamente na umidade ótima e no peso específico seco máximo obtido para um mesmo material. As resistências do material, ensaio de CBR, tiveram também alterações significativas com energias diferentes. Também, observou-se nos ensaios com agregados da Itaquera um aumento de sua capacidade de suporte, após 28 dias de cura, ocasionado por reação pozolânica de partículas não inerte presente.

Tabela 2.7 - Resultados dos agregados reciclados e brita (BGS)

Amostra	Material	Procedência	Teor de umidade de compactação (%)	Energia de compactação	Massa esp. ap. seca (kN/m ³)	CBR (%)
01	Agregado reciclado	Santo André	16,2	Normal	16,1	45,5
02	Agregado reciclado	Santo André	14,2	Intermediaria	17,2	96,0
03	Agregado reciclado	Itaquera	11,0	Intermediaria	18,3	76,0
03	Agregado reciclado	Itaquera	11,0	Intermediaria	18,3	74,0
04 (*)	Agregado reciclado	Itaquera	11,0	Intermediaria	18,3	87,0
04 (*)	Agregado reciclado	Itaquera	11,0	Intermediaria	18,3	101,0
05	Brita graduada simples	Usina Firpavi	5,7	Intermediaria	22,8	90,0

(*) Material submetido a ensaio de CBR após 28 dias de cura.

Fonte: LEITE *et al.* (2005)

Motta (2005) estudou agregados reciclados mistos de São Paulo para a aplicação em pavimentos de tráfego leve. Nesta pesquisa foi avaliado também o módulo de resiliência do agregado reciclado *in natura* aos 90 dias de cura, que teve valores semelhantes ao da brita graduada simples convencional, sob a mesma condição de graduação, energia de compactação Intermediaria e tensão de confinamento. Para uma tensão-desvio de 0,20 MPa, o módulo de resiliência do agregado reciclado variou entre 190 MPa e 400 MPa. Também foi estudado nesta pesquisa o agregado reciclado com a adição de 4% de cimento e 4% de cal. Neste caso os

módulos de resiliência ficaram entre 900 MPa e 1900 MPa para os corpos de prova com adição de cal, e o com adição de cimento entre 1100 MPa e 2100 MPa.

Leite (2007), estudando os agregados reciclados de Santo André, verificou um aumento no valor do módulo de resiliência na energia modificada, entre 200 MPa e 500 MPa, comparando com os valores obtidos no ensaio com amostras compactadas na energia intermediária, variando entre 160MPa e 440MPa, de acordo com o nível de tensão aplicada. Os resultados apresentados por LEITE (2007) mostram que com o aumento da energia de compactação das camadas dos pavimentos no campo, pode colaborar para redução da deformabilidade do pavimento.

Leite (2007) analisou, também em sua pesquisa, a influencia da energia de compactação na granulometria do agregado reciclado. Ocorreram alterações na porcentagem passante em todas as peneiras utilizadas, onde a quantidade de material fino passante na peneira 0,075 mm dobrou, após a compactação na energia modificada. Essa diferença na granulometria reforçou a importância da energia de compactação elevada, obtendo-se a maior quebra dos grãos possível durante a execução da compactação do material no campo, para minimizar o problema de degradação, evitando possíveis afundamentos ou rupturas indesejáveis.

Os agregados reciclados de resíduos de concreto oriundo da Usina de Reciclagem de Resíduos de Construção Civil de São Carlos foram analisados por GRUBBA (2009). O material estudado apresentou um comportamento mecânico muito próximo ao de um agregado natural utilizado em camadas de base e ou sub-base de pavimento da região.

Grubba (2009) estudou o comportamento resiliente de agregados reciclados de concreto (ARC). Para materiais semelhantes ao desta pesquisa, encontrou valores de módulo de resiliência muito próximos aos dos agregados naturais. Para um estado de tensão no centro de uma camada de base de 15 cm, obteve um módulo de aproximadamente 228 MPa, para energia de compactação modificada.

Foi observado também na pesquisa, um ganho de resistência e rigidez com o decorrer do tempo de cura do material reciclado de RCC de concreto estudado. Resultados apresentados na

pesquisa do módulo de resiliência, considerando a tensão confinante de 100 kPa, na comparação das amostras compactadas nas energias intermediária e modificada, com ou sem cura de 90 dias: agregados reciclados de concreto compactados na energia intermediárias sem cura e após cura de 90 dias aproximadamente 200 MPa e 660 MPa, respectivamente; agregados reciclados de concreto compactados na energia modificada sem cura e após cura de 90 dias, aproximadamente 270 MPa e 700 MPa, respectivamente (GRUBBA, 2009).

A Tabela 2.8 apresenta alguns modelos de módulo de resiliência encontrados nas pesquisas bibliográficas, para diferentes tipos de agregados reciclados.

Tabela 2.8 - Modelos de módulo de resiliência

Procedência	Composição do agregado reciclado	Energia de Compactação	Modelo obtido	Autor
Rio de Janeiro	Misto (Cinza e vermelho)	Intermediária	$M_R 528 \sigma_3^{0,47} \sigma_d^{-0,24} (1)$	FERNANDES (2004)
	Misto (Cinza e vermelho)	Modificada	$M_R 563 \sigma_3^{0,46} \sigma_d^{-0,26} (1)$	
Estados Unidos	ARC (agregado reciclado de concreto)	Normal	$M_R 25,35 \theta^{4615} (2)$	BENNERT et. Al. (2000)
Austrália	ARC (agregado reciclado de concreto)	Modificada	$M_R 10.387 \theta^{0,5939} (3)$	NATAATMADJA E TAN (2001)
Santo André	Misto (vermelho e Cinza)	Intermediária	$M_R 440 \theta^{0,467} (4)$	LEITE (2007)
	Misto (vermelho e Cinza)	Modificada	$M_R 500 \theta^{0,426} (4)$	
São Carlos	ARC (agregado reciclado de concreto)	Modificada Tempo de cura 90 dias	$M_R 10,4 \sigma_3^{0,90}$ $M_R 14,4 \sigma_3^{0,96} \sigma_d^{-0,12}$	GRUBBA (2009)

(1) M_R , σ_3 , σ_d em [MPa] - Moldados em corpos de prova cilíndricos 100mm x 200mm

(2) M_R em [MPa] e θ em [kPa] - Moldados em corpos de prova cilíndricos 150mm x 300mm

(3) M_R e θ em [kPa] - Moldados em corpos de prova cilíndricos 100mm x 200mm

(4) M_R em [MPa] e θ em [kPa] - Moldados em corpos de prova cilíndricos 150mm x 300mm

2.6.2 Experiência de Belo Horizonte – MG

A Prefeitura Municipal de Belo Horizonte utiliza agregado reciclado de RCC em camadas de base e sub-base de pavimentos, desde 1996. De 1996 até 2001, foram utilizadas quase 137.000

toneladas de RCC's na implantação e construção de 271 vias, totalizando aproximadamente 400 Km de vias em Belo Horizonte (DIAS, 2004).

De acordo com Pinto (1999), observaram uma surpreendente "coesão" após a abertura de uma base, meses depois da sua execução. A camada exposta, após a abertura, apresentava-se consolidada, demonstrando a ocorrência de componentes reativos no RCC's que agiram com a exposição à umidade natural dos solos locais e da execução e compactação das camadas.

No dimensionamento das camadas dos pavimentos utilizaram os resultados dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia dos materiais e na prática de engenheiros experientes. Muitas vias em Belo Horizontes foram construídas pela prefeitura utilizando os agregados reciclados, apresentando em condições de tráfego semelhante com as que foram construídas com agregados convencionais. No entanto, não se pode afirmar se houve, ou não, um superdimensionamento das camadas destes pavimentos (FERNANDES, 2004).

2.6.3 Experiência de Goiânia - GO

Em Goiânia foi construída uma pista experimental, no final de 2003, utilizando na camada de base e sub-base uma mistura de agregados reciclados de RCC com solo local argiloso de comportamento laterítico, realizada através de uma parceria entre a Prefeitura Municipal de Goiânia, empresas da região, Universidade Federal de Goiás e a de Brasília (OLIVEIRA, 2007). As frações granulométricas empregadas nestas pistas foram brita de 19 mm, brita de 9 mm e areia, sendo a mistura enquadrada na faixa D do DNER de base estabilizadas granulometricamente (MENDES et al., 2004).

A pista experimental tem um comprimento de 100m, sendo 50m construídos com agregados reciclados nas camadas de base e sub-base. Em novembro de 2004, a pista foi liberada para o tráfego e iniciaram o monitoramento de campo. Como a pista era acesso à central de abastecimento da cidade, apresentava considerável tráfego de caminhões. Observando os valores apresentados na Tabela 2.9, é possível notar que as deflexões características obtidas nos ensaios de Viga Benkelman, realizadas sobre o revestimento asfáltico da pista experimental entre os

meses de janeiro de 2004 a maio de 2006, foram menores que as deflexões máximas admissíveis, recomendadas pelo DNER PRO 011/79 e DNER PRO 2698/94, porém, foram crescentes (OLIVEIRA, 2007).

Tabela 2.9 - Resumo das deflexões características da pista experimental de Goiânia

Data	D_c (10^{-2} mm)	D_{adm} PRO 011 (10^{-2} mm)	D_{adm} PRO 269 (10^{-2} mm)
01/2004	57	90	105
09/2004	52	90	105
05/2005	78	90	105
11/2005	78	90	105
05/2006	71	90	105

* No cálculo das deflexões admissíveis foi utilizado N igual a 10^6 repetições do eixo padrão.

Fonte: OLIVEIRA (2007)

2.6.4 Experiências internacionais de Pavimentação com agregados reciclados.

Na década de 90, como o consumo de materiais de construção estava crescendo muito, realizaram pesquisas no Reino Unido verificando a viabilidade do emprego de agregados reciclados em camadas de pavimentos. Por meio de ensaios de Índice Suporte Califórnia verificou-se que os resíduos de concreto britados apresentaram comportamento semelhante à brita calcária. Já os agregados de resíduos de alvenaria apresentaram uma capacidade de suporte menor do que da brita de calcário. Contudo, ambas apresentaram ISC maior que 30%, limite estipulado pelo Reino Unido para materiais empregados em camada de sub-base (O' MAHONY e MILLIGAN, 1991).

Em New Jersey nos Estados Unidos, foi verificada a viabilidade do emprego de agregados reciclados de concreto em base e sub-bases de pavimentos, através de ensaios triaxiais de carga repetida determinando o módulo de resiliência e a deformação permanente, de varias porcentagens de agregados reciclados misturado com brita graduada simples - BGS. Os resultados obtidos indicaram que as amostras de agregados reciclados de concreto e as misturas de agregados reciclados de concreto com BGS apresentam resultados de módulo de resiliência

superiores ao da BGS. Porém, a deformação permanente do agregado reciclado de concreto foi superior a da BGS sob as mesmas condições de ensaio (BENNERT *et al.*, 2000).

Os agregados reciclados de resíduos de concreto são utilizados na Austrália desde a década de 90. Os resultados obtidos na pesquisa, realizada em 2001, indicaram que a resistência à compressão do concreto de origem influencia no módulo de resiliência e na deformação permanente de agregados reciclados de concreto, porém, o mais importante para o resultado no módulo é a granulometria (NATAATMADJA e TAN, 2001).

Alguns pesquisadores, Arm (2001), Blanknagel (2005) e Poon *et al.* (2006), observaram o efeito da cimentação nos agregados reciclados de resíduos de concreto (ARC) quando empregado em camadas de base e sub-base. A possível cimentação entre as partículas dos agregados reciclados ocorrem pela presença de atividade pozolânicas.

No estado de Utah, nos Estados Unidos, foram estudados os agregados reciclados de concreto, com o objetivo de verificar o potencial auto-cimentante. Os resultados obtidos nesta pesquisa indicaram um ganho considerável na resistência com o tempo, ganho de 130% no tempo de 0 a 3 dias e de 180% no tempo de 0 a 7 dias. Segundo os autores Blankenagel e Guthrie (2006), acredita-se que reações pozolânicas e ou hidratação de partículas de cimento nos agregados de resíduos de concreto sejam responsáveis pelo aumento na resistência.

Arm (2001) analisou a melhoria do comportamento mecânico com o tempo, após compactação das amostras do agregado reciclado de resíduos de concreto e agregados convencionais, através dos valores dos módulos de resiliência. O autor verificou, para todos os níveis de tensão analisadas, um aumento no valor do módulo de resiliência com o tempo das amostras de ARC, e valores superiores de módulo de resiliência do agregado reciclado com 60 dias em relação ao agregado natural com 90 dias. Os resultados apontam para um possível potencial de auto-cimentação do ARC com o tempo, em função de prováveis atividades pozolânicas.

Neste capítulo são apresentados os materiais estudados e os procedimentos utilizados na investigação experimental para se alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, onde se estuda, a viabilidade técnica e econômica da substituição dos agregados reciclados estudados pelo agregado convencional, através de ensaios laboratoriais, dimensionamentos de pavimentos tipos e do levantamento dos custos de execução. O programa experimental deste trabalho analisou algumas características físicas e propriedades mecânicas da bica corrida e BGS recicladas resíduos da construção civil mista (vermelho e cinza) da região de Americana – SP.

3.1 MATERIAIS E CONSTITUINTES

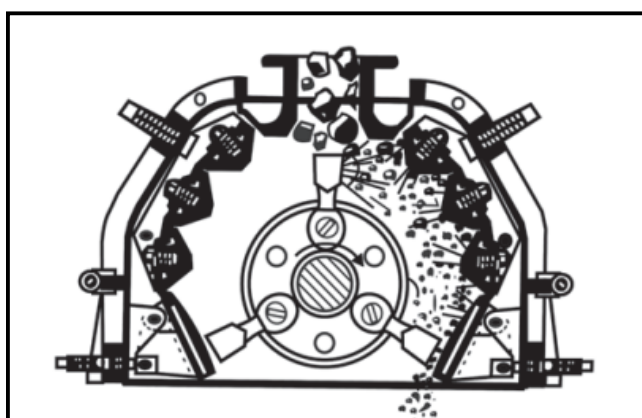
O agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil mista (vermelho e cinza) utilizado no trabalho é um subproduto obtido a partir da reciclagem de resíduos de construções e demolições da região de Americana, e o processo de reciclagem foi executado através da Usina de Cemara Pró Ambiental.

A usina de Americana recicla os resíduos Classe A (rochas, concretos, solos, argamassa, cerâmicas etc.) em bica corrida (material britado, mas que não passou pelo processo de classificação por peneiras, com dimensão máxima característica de 63 mm), pedras 1 e 2, pedrisco, areia e brita graduada simples (BGS) reciclada. Este último apresenta em sua composição 60% de material fino e 40 % de material grosso.

Os resíduos foram britados em um britador de Impacto, sendo posteriormente transportados por correias até as peneiras, onde foram separados por faixas granulométricas. O

impacto refere-se à colisão instantânea dentro do britador, como um mecanismo para redução de tamanho dos resíduos de construção civil, conforme demonstrado na Figura 3.1. Dessa forma, obtidos o pedrisco e a brita, cujas dimensões máximas são, respectivamente, 6,3 mm e 39 mm. Os materiais estudados são: a bica corrida reciclada, material britado, mas que não passou pelo processo de classificação por peneiras, com dimensão máxima característica de 63 mm; e o BGS reciclado apresentando em sua composição 60% de material fino e 40 % de material grosso.

Figura 3.1 - Britador de Impacto



Fonte: Roberts et al., 1996

Os materiais estudados são tipicamente utilizados, nas estruturas dos pavimentos, na cidade de Americana. A Figura 3.2 apresenta parte das instalações da Usina Cemara.

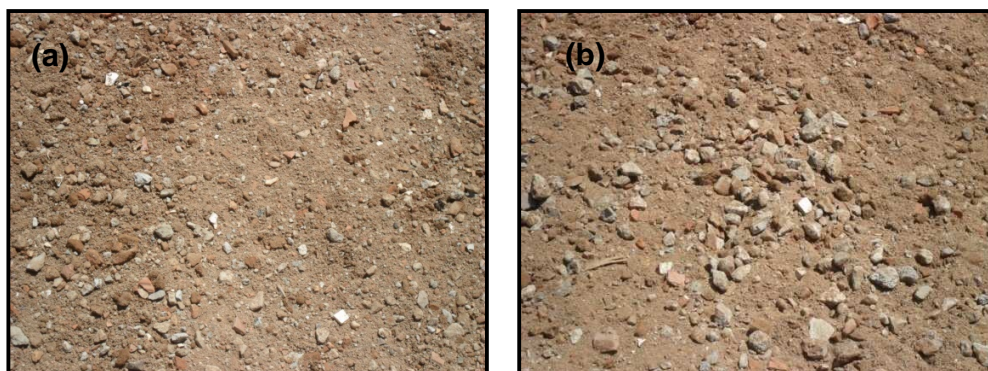
O agregado reciclado estudado foi coletado aleatoriamente da pilha de produção no mês de Março de 2011, de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004). A amostra foi coletada no mesmo dia. O material foi homogeneizado antes do seu armazenamento no laboratório. Os ensaios de granulometria, índice de forma, compactação proctor e CBR foram realizados em um laboratório privado, e os ensaios Triaxiais de carga cíclica no laboratório de Tecnologia de Pavimentação da USP de São Paulo. A Figura 3.3 ilustra os agregados reciclados estudados.

Figura 3.2 - Usina de Reciclagem de RCC Cemara Pró Ambiental



Fonte: Cemara Pró-ambiental, disponível em <http://www.cemara.com.br/proambiental/>

Figura 3.3 – Materiais estudados – (a) bica corrida reciclada de RCC mistos; (b) BGS (60% de material fino e 40% de britas recicladas) reciclada de RCC mistos.



Segundo Lima (1999), os materiais que constituem o entulho da construção civil influem diretamente nas propriedades dos agregados reciclados, tais como resistência mecânica, massa específica, absorção de água, forma e dimensões dos grãos, portanto é uma etapa importante a determinação da composição do agregado reciclado de resíduo da construção civil. Neste trabalho, com a finalidade de compreender melhor o comportamento do agregado reciclado e a natureza dos componentes do RCC gerados na região de Americana, foram realizadas as caracterizações.

Para determinar os constituintes que compõem o agregado reciclado estudado da região de Americana, separou-se um saco plástico de aproximadamente 15kg com a amostra da BGS reciclada de resíduos de construção civil. Optou-se por analisar o agregado reciclado nomeado pela usina como BGS, pois visualmente, as amostras estudadas BGS e brita corrida reciclada, apresentam semelhança nos materiais constituintes.

A caracterização foi realizada apenas em material retido na peneira 4,8mm, pois a caracterização foi realizada a “olho nu”, o que impedia que os materiais menores pudessem ser identificados. Os grãos foram separados por classes de acordo com a sua natureza: material

vermelho (telhas e blocos cerâmicos), material cinza (concreto, argamassa, blocos de concreto), solos (partículas menores passante da peneira 4,8mm) e outros (resíduos indesejáveis).

Os materiais indesejáveis no resíduo da construção civil destinados na produção de agregados reciclados são os resíduos pertencentes à classe B, C e D da Resolução CONAMA nº 307 (CONAMA,2002), tais como: madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas, papéis e outros. De acordo com a NBR 15115 (ABNT, 2004), para utilização do agregado reciclado em pavimentação, a porcentagem máxima aceita dos materiais indesejáveis de grupos distintos deve ser de 3%. Para verificar se os materiais estudados atendem as especificações da norma, foram determinadas as porcentagens de materiais indesejáveis na caracterização a “olho nu”.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO

O programa experimental deste trabalho analisou algumas características físicas e propriedades mecânicas dos materiais estudados por meio de ensaios de laboratório comumente empregados nas pesquisas relacionadas aos materiais convencionais de pavimentação e conforme a especificação da norma NBR 15116 (ABNT, 2004).

3.2.1 Ensaio de Índice de Forma

A forma dos grãos é considerada um fator importante no comportamento mecânico de materiais granulares, sendo avaliada pelo arredondamento ou esfericidade da partícula (PINTO, 1969). Os materiais constituintes e os tipos de equipamentos utilizados durante o processo de britagem caracterizam a forma dos grãos dos agregados reciclados. O agregado reciclado pode apresentar a forma mais lamelar e uma textura mais áspera que os materiais convencionais (LIMA, 1999).

As normas brasileiras, NBR 15115 (ABNT, 2004) e a PMSP/SP ETS-001 (PMSP, 2003), recomendam que o agregado reciclado tenha no máximo 30% de grãos lamelares.

As determinações da forma da fração graúda das amostras de agregado reciclado estudadas foram realizadas de maneira análoga ao especificado no NBR 6954 (ABNT, 1989), para lastro padrão utilizada nas vias férreas. A norma recomenda a medição das dimensões comprimento (a), largura (b) e a altura (c) de cada grão, com um paquímetro, classificando-os conforme segue na Tabela 3.1. Os resultados são apresentados em porcentagem de partículas lamelares, alongadas, cúbicas e alongadas-lamelares.

Tabela 3.1 – Classificação da forma dos grãos de acordo com NBR 6954 (ABNT, 1989)

Media das relações b/a e c/b	Classificação da forma
b/a maior que 0,5 e c/b maior que 0,5	Cúbico
b/a menor que 0,5 e c/b maior que 0,5	Alongado
b/a maior que 0,5 e c/b menor que 0,5	Lamelar
b/a menor que 0,5 e c/b menor que 0,5	Alongado-lamelar

3.2.2 Ensaio de Granulometria

Os solos e agregados são constituídos de partículas de diferentes dimensões em proporções variadas. Foram determinadas as dimensões e suas porcentagens das frações das amostras de bica corrida e BGS recicladas secas, antes e após a compactação Proctor, obtendo as curvas granulométricas com os resultados obtidos.

Como as amostras estudadas possuem partículas da fração grossa e fina, tornou-se necessário a análise granulométrica conjunta, por peneiramento e sedimentação, conforme NBR 7181 (ABNT, 1984) utilizada para solos.

As distribuições granulométricas dos materiais graúdos foram obtidas através do processo de peneiramento. Para o material fino, partículas menores de 0,075mm, foi utilizado o procedimento da sedimentação dos sólidos no meio líquido baseando na teoria de calculo da Lei de Stokes, que relaciona o tamanho das partículas com a velocidade com que ela sedimenta em um meio líquido.

De acordo com a forma da curva granulométrica obtida é possível classificar granulometricamente o material em: mal graduado, bem graduado ou uniforme. A classificação baseia-se no equilíbrio, predomínio ou ausência das frações grossas e finas por cálculo de índice que expressam a forma da curva, o coeficiente de não uniformidade (C_{nu}). Este coeficiente é calculado pela equação 3.1.

$$C_{nu} = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde:

C_{nu} : coeficiente de não uniformidade;

d_{10} : diâmetro correspondente a 10% da porcentagem passante, em [mm];

d_{60} : diâmetro correspondente a 60% da porcentagem passante, em [mm].

As normas brasileiras NBR 15115 (ABNT, 2004) e PMSP/SP ETS-001 (PMSP, 2003) estabelecem algumas características do agregado reciclado de RCC para serem empregados em camadas de pavimentos urbanos. Tabela 3.2 apresenta as características e limites contemplados na normalização brasileira.

Tabela 3.2 – Especificações com relação à granulometria dos agregados reciclados

Norma	Dimensão característica máxima dos grãos (mm)	Porcentagem que passa na peneira 0,42mm (%)	C_u	C_c
NBR 15115 (ABNT, 2004)	63,5	$10 \leq a \leq 40$	≥ 10	Não consta
PMSP/SP ETS-001 (PMSP 2003)	50,00	$10 \leq a \leq 30$	≥ 10	$1 \leq a \leq 3$

Nesta pesquisa, os resultados obtidos nos ensaios de granulometria são apresentados por meio de curvas granulométricas e tabelas com frações e porcentagens. Foram calculados e analisados os coeficientes de não uniformidade. A Figura 3.4 ilustra o ensaio de granulometria realizado na pesquisa

Figura 3.4 - Ensaio de granulometria: (a) e (c) BGS reciclada de RCC mistos; (b) bica corrida reciclada de RCC mistos.



3.2.3 Ensaio de Compactação Proctor

A compactação é a operação da qual resulta o aumento da massa específica aparente do material (solo, agregados, misturas betuminosas) pela aplicação de energia por impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica, o que faz com que os grãos constitutivos do maciço entrem em contato pela expulsão de ar. A compactação proporciona ao maciço, aumento da resistência ao cisalhamento, redução e a tendência de variação dos teores de umidade dos materiais constituintes da camada do pavimento, diminuição da permeabilidade e da deformabilidade, (PINTO, 2000; LEITE, 2007).

Os ensaios de compactação foram conduzidos nos materiais estudados, BGS e bica corrida reciclada, para determinação da massa específica seca máxima e umidade ótima. Optou-se por trabalhar nesta pesquisa com a energia de compactação Proctor intermediário, pelo fato da norma NBR 15115 (ABNT, 2004) recomendar no mínimo essa energia para execução de camadas de bases e sub-bases de pavimentos.

Atendendo a NBR 7182 (ABNT, 1986) e com o propósito de obter-se uma curva de compactação com dois pontos no ramo seco, um próximo à umidade ótima e dois no ramo úmido da curva, foram moldados cinco corpos de prova, sem reuso do material. No ensaio, as amostras foram compactadas em cinco camadas no cilindro grande 152 mm de diâmetro por 125 mm de altura, utilizados nos ensaios de CBR, com aplicação de 26 golpes por camada utilizando o soquete grande 4,5kg. A Figura 3.5 ilustra os ensaios de compactação.

Figura 3.5 - Ensaio de Compactação



De acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986), que prescreve a preparação de amostra de solo para ensaios de compactação, um material pode ter sua fração retida na peneira 19,0 mm substituída desde que esta porcentagem não seja superior a 30%. No caso da amostra aqui estudada BGS reciclada, a quantidade de material retido na peneira 19 mm foi de aproximadamente 28%, o que permitiu a substituição do material retido na peneira 19 mm por igual quantidade em peso do material passante na peneira 19 mm e retido na 4,8 mm.

3.2.4 Ensaio de Índice Suporte Califórnia

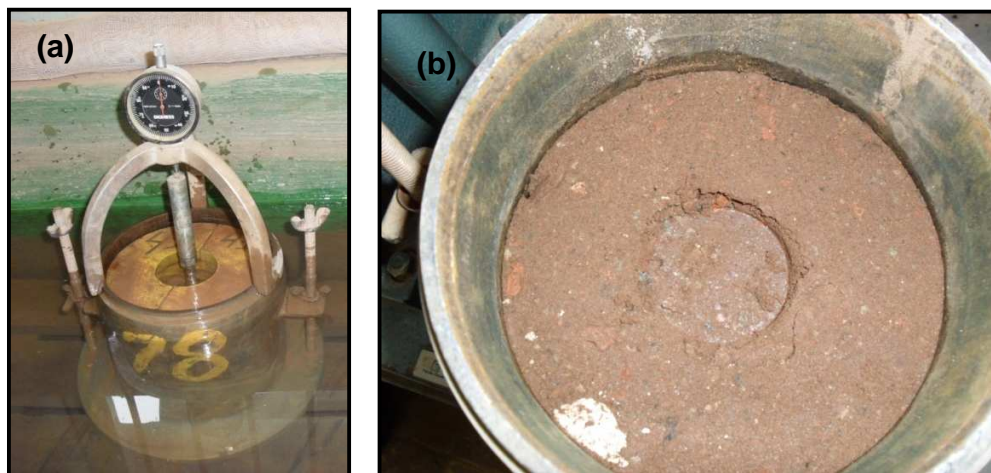
Na NBR 15115 (ABNT, 2004) e a PMSP/SP ETS-001 (PMSP, 2003) utilizam o valor do CBR como parâmetro para emprego do agregado reciclado em pavimentação. São especificados na norma valores mínimos de CBR de acordo com a função estrutural do material no pavimento e

de expansão: base, sub-base ou reforço de subleito, conforme apresentado no capítulo 2 deste trabalho na Tabela 2.5.

O ensaio de ISC (Índice de Suporte Califórnia), também conhecido como CBR (*California Bearing Ratio*), trata-se de um método de ensaio empírico, bastante difundido no meio rodoviário, para dimensionamento de pavimentos. O ensaio de CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova compactado com a amostra estudada, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente (DNIT, 2006).

As determinações do ISC das amostras estudadas seguiram as especificações da norma DNER–ME 049 (DNIT, 1994), conforme ilustra a Figura 3.6.

Figura 3.6 - Ensaio de CBR: (a) amostra em imersão; (b) amostras após ensaio de penetração



3.2.5 Módulo de Resiliência

O termo resiliência significa energia acumulada em um corpo deformado elasticamente, desenvolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Os materiais que compõem um pavimento, em sua maioria, não apresentam comportamento elástico, sofrendo deformações

permanentes após aplicação de carga. Contudo, segundo HUANG (2004), pode-se considerar os materiais elásticos, se o valor do carregamento comparado com a resistência do material for pequeno e se para um grande número de repetições as deformações são quase totalmente recuperáveis para cada aplicação. A deformação recuperável do material e ou pavimento, quando submetido a carregamentos repetidos, é denominada deformação resiliente.

O módulo de resiliência é determinado a partir de ensaios triaxiais de carga cíclica, em que a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de zero a um máximo e depois diminui até anular, ou atingir um valor inferior, para atuar novamente após um tempo de repouso, procurando reproduzir as condições no campo (MOTTA, 1991). O módulo é a razão entre a tensão desvio, denominada σ_d , e a deformação elástica recuperável ou resiliente, denominada ε_r , sendo calculado através das equações 3.2 e 3.3. A tensão desvio é a diferença entre a tensão principal maior axial (σ_1) subtraída da tensão principal menor de confinamento (σ_3).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} \quad \text{Equação 3.2}$$

onde:

MR: módulo de resiliência

σ_d : é a tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$);

ε_r : é a deformação resiliente axial (vertical), conforme equação 3.3.

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde:

Δh : é o deslocamento vertical máximo;

h_0 : é a altura inicial de referência do corpo de prova cilíndrico correspondente ao posicionamento do LVDTs.

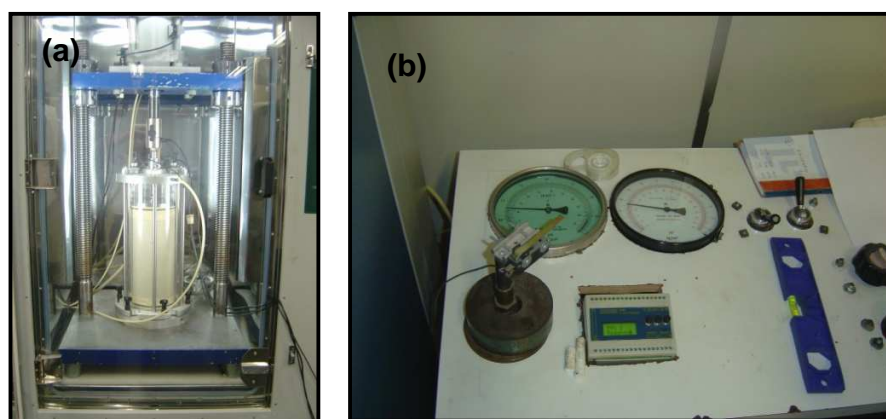
O tipo e a duração do carregamento utilizado em um ensaio triaxial cíclico devem simular o que ocorre no campo (HUANG, 2004). Com objetivo de avaliar as propriedades mecânicas dos

agregados reciclados estudados na pavimentação procuram simular as condições reais de solicitação no campo, foram realizados os ensaios triaxiais cíclicos para determinação do módulo de resiliência.

Os ensaios foram realizados de acordo com o especificado na norma DNIT 134:2010 (DNER, 2010) para solos. O equipamento utilizado nesta pesquisa foi o triaxial de carga repetida do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP-EPUSP). O equipamento possui um sistema de carregamento pneumático, no qual as tensões, desvio e confinantes, são controlados por computador através de válvulas e os deslocamentos do corpo de prova são medidos com auxílio de dois transdutores mecânico eletromagnéticos, tipo LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*), presos no terço médio do mesmo. O fluido usado confinamento dos corpos de prova no interior da câmara triaxial é o ar. A Figura 3.7 ilustra o equipamento utilizado.

Para o ensaio de módulo de resiliência foram compactados corpos-de-prova de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura, utilizando a amostra total, não sendo necessário realizar a substituição da fração retida na peneira 19 mm, justificada pelas dimensões dos corpos de prova.

Figura 3.7 - Equipamento Triaxial de Carga repetida do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

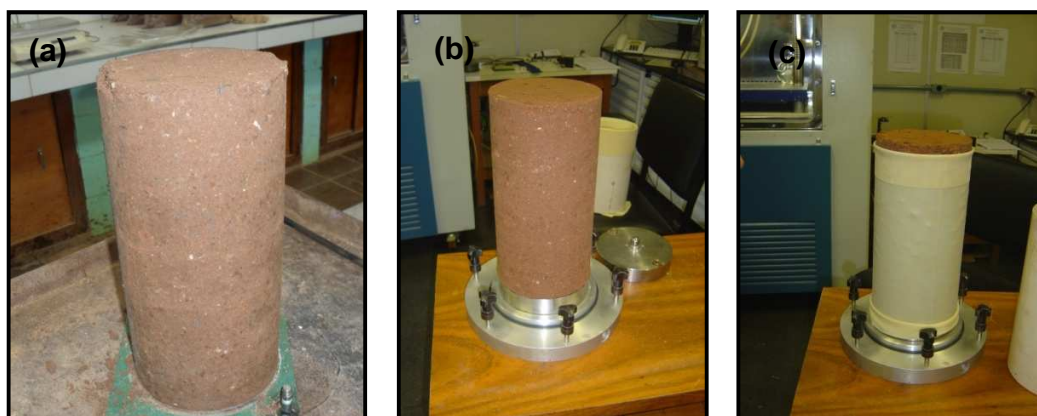


Em laboratório foram moldados quatro corpos de prova de cada material estudado, BGS e brita corrida reciclada: um corpo de prova para cada idade ensaiada, 4, 50 e 90 dias, para cada

material. Os corpos de prova permaneceram em processo de cura em câmara úmida até as idades de ensaio. Os corpos de prova foram envolvidos por uma membrana de borracha para a realização do ensaio triaxial cíclico, conforme ilustra a Figura 3.8.

A Norma DNIT 134 (DNIT, 2010), especifica uma cura mínima de 6 horas para submeterem-se os corpos de prova aos ensaios. Os períodos foram aplicados nesta pesquisa baseando-se nas recomendações européias, de quatro a sete dias de cura, e idades posteriores para verificar um possível aumento da resistência com o tempo, devido à presença de materiais cimentantes.

Figura 3.8 - Corpo de prova para ensaio Triaxial: (a) após compactação; (b) após cura; e (c) envolvidos por uma membrana de borracha antes do ensaio



De acordo com as especificações da norma DNIT 134 (DNIT, 2010), o primeiro estágio do ensaio do triaxial cíclico consiste no condicionamento dos corpos de prova, cuja finalidade é eliminar as deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão desvio e de reduzir o efeito da história de tensões no valor do módulo. Foram aplicadas, neste estágio de condicionamento, 200 repetições para cada tensão desvio, na sequência constante da Tabela 3.3. Neste trabalho, a frequência das cargas repetidas foi de 1 Hz (60 ciclos por minuto) e a duração cerca de 0,10 segundo e 0,90 segundo de tempo de repouso.

Tabela 3.3 – Sequência de tensões para primeiro estágio de condicionamento

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d	Razão de Tensões σ_1/σ_3
68,9	68,9	2
68,9	206,8	4
102,9	309,0	4

A medição das deformações resilientes se faz após a fase de condicionamento, ou seja, após acomodação das partículas da amostra compactada na câmara do triaxial. Ajustam-se novamente os transdutores e inicia-se o ensaio triaxial com aplicação de 18 ciclos de carga, sendo 10 aplicações de carga por ciclo. A Tabela 3.4 apresenta a sequência de 18 pares de tensões para obtenção das leituras das deformações especificadas na norma DNIT 134 (DNIT, 2010). No sistema de controle e aquisição de dados para o ensaio triaxial de cargas repetidas somente a primeira parcela elástica é considerada na determinação do módulo de resiliência.

Tabela 3.4 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência DNIT 134:2010

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)
20,7	20,7
	41,4
	62,1
34,5	34,5
	68,9
	102,9
50,4	50,4
	102,9
	155,2
68,9	68,9
	137,9
	206,8
102,9	102,9
	206,8
	309,0
137,9	137,9
	274,7
	412,0

Realizados os ensaios segundo a referida seqüência de carregamento, é possível modelar a variação do módulo de resiliência dos materiais segundo a variação do estado de tensão. A Tabela 3.5 apresenta os modelos considerados neste trabalho.

Tabela 3.5 – Modelos avaliados na representação do MR dos agregados reciclados da região de Americana em função do estado de tensão DNIT 134:2010

Modelo		
Composto	$MR = K_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	(Equação 3.4)
Tensão confinante (k- σ_3)	$MR = K_1 \sigma_3^{k_2}$	(Equação 3.5)
Tensão desvio (k- σ_d)	$MR = K_1 \sigma_d^{k_2}$	(Equação 3.6)

Obs.: k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros de regressão

3.3 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO

As estruturas dos pavimentos flexíveis no Brasil são dimensionadas, na maioria das vezes, pelo método empírico do DNER, com base no ensaio de ISC e nas curvas de dimensionamento de pavimentos do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA. O método considera o conceito de equivalência estrutural estabelecido em uma pista experimental da AASHO. Como este método é muito difundido no Brasil, optou-se por adotar esta metodologia nas determinações das espessuras das camadas dos pavimentos.

Os estudos geotécnicos para o dimensionamento do pavimento compreendem: a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos solos do subleito, visando à caracterização e o dimensionamento das diversas camadas, sendo que, de acordo com as especificações do Manual do DNIT (DNIT, 2006) devem apresentar uma expansão $\leq 2\%$ e um CBR mínimo de 2%; o estudo de ocorrências de materiais disponíveis para pavimentação, visando a caracterização destes através dos ensaios laboratoriais que, no caso dos agregados reciclados, devem seguir as especificações citadas anteriormente da NBR 15115 (ABNT, 2004).

O pavimento é dimensionado em função do número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão de 80 kN (8,2 tf), durante o período de projeto, denominado N, ou seja em função do tráfego. Na determinação do número N, é considerado o volume médio diário de tráfego, um período de anos da vida útil do pavimento a ser projetado, uma taxa de crescimento anual do tráfego, fator de conversão dos eixos e fator de carga.

Face a natureza de cada camada constituinte da estrutura típica de um pavimento, são atribuídos os mesmos coeficientes de equivalência estrutural, uma vez que a espessura total obtida através do gráfico de dimensionamento seria aquela necessária para um pavimento constituído por uma camada granular convencional, onde o coeficiente de equivalência estrutural K é igual a 1. Os coeficientes de equivalência estrutural adotados, para efeito do dimensionamento das diversas camadas dos pavimentos, são os constantes da Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Coeficiente de equivalência estrutural DNIT (2006)

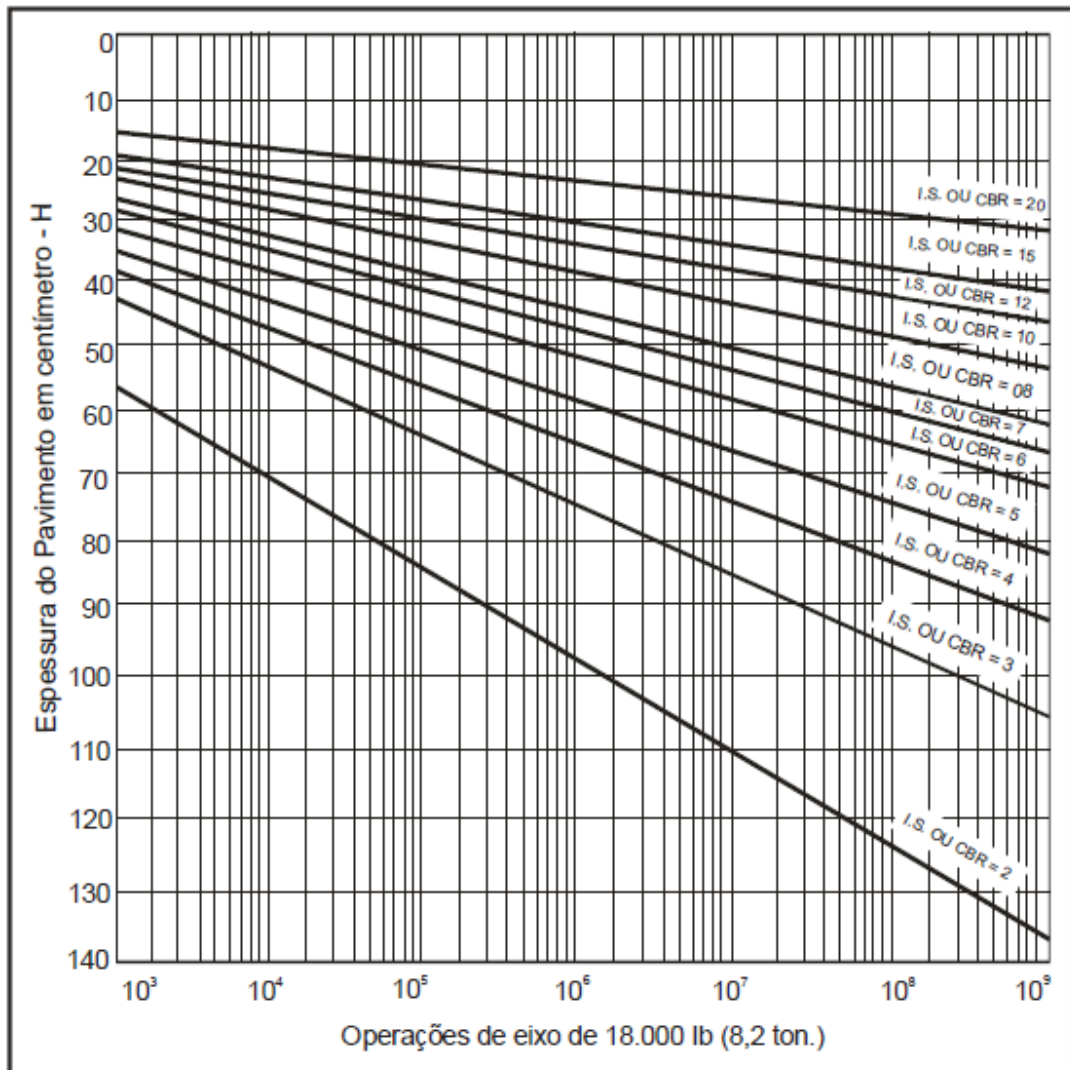
Componentes do pavimento	Coefficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,0
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,7
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,4
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,2
Camadas granulares	1,0
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,7
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,4
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,2

Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006)

A espessura de cada camada do pavimento deverá ser calculada com o emprego do gráfico da Figura 3.9 e da equação 3.7. O gráfico determina a espessura total do pavimento, em função do número N e do CBR. Entrando-se em abscissa com o valor do número N, procede-se verticalmente até encontrar a reta que representa o valor do ISC, encontrando-se o valor da espessura do pavimento.

No dimensionamento do pavimento pelo método DNER, a espessura do pavimento necessária para proteger o subleito é determinada pelo CBR de 20%. Utiliza-se este valor mesmo que o resultado obtido no ensaio do material empregado nesta camada apresente-se superior.

Figura 3.9 - Curva de dimensionamento pelo CBR - método DNIT



Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006)

Calculam-se as espessuras das camadas pela equação 3.7, conforme ilustração do perfil do pavimento na Figura 3.10.

$$RK_R + BK_B \geq H_{20}$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} \cdot K_{SB} \geq H_n$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} \cdot K_{SB} + h_n K_{ref} \geq H_m$$

Equação 3.7

Onde:

R: Espessura do revestimento;

K_R: Coeficiente estrutural do revestimento;

B: espessura da base;

K_B: Coeficiente estrutural da base

h₂₀: Espessura da sub-base;

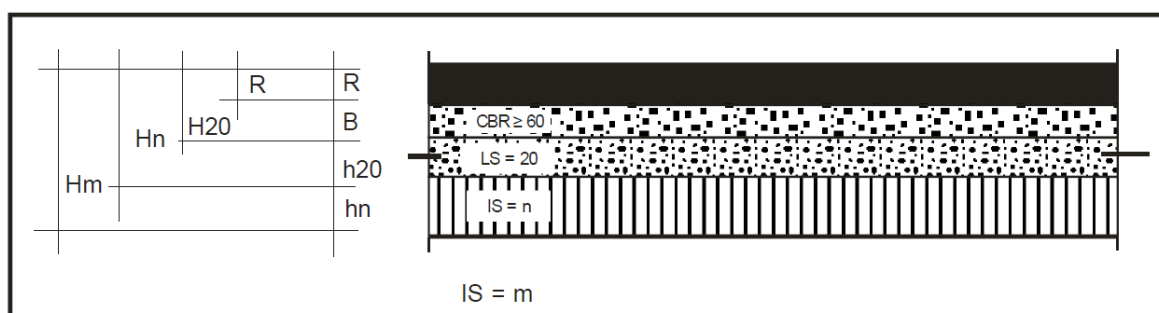
K_{SB}: Coeficiente estrutural da sub-base;

H_n: Espessura do reforço do subleito;

K_{ref}: Coeficiente estrutural do reforço do subleito;

H_m: Espessura total das camadas do pavimento.

Figura 3.10 - Simbologia das inequações do cálculo das espessuras das camadas do pavimento flexível pelo método DNER



Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006)

Os valores de índice suporte Califórnia e de expansão são requisitos especificados na norma NBR 15115 (ABNT, 2004) para agregados reciclados de resíduos de construção civil destinado à construção das camadas do pavimento. Conforme os valores mínimos apresentados nesta pesquisa na Tabela 2.5: reforço do subleito $ISC \geq 12\%$ e expansibilidade $\leq 1\%$, energia

normal, revestimento primário e sub-base $ISC \geq 20\%$ e expansibilidade $\leq 1\%$ energia intermediária, base $ISC \geq 60\%$ e expansibilidade $\leq 0,5\%$ energia intermediária ou modificada.

3.4 ESTUDO PARAMÉTRICO

O objetivo desta pesquisa é análise da viabilidade técnica e econômica da utilização dos agregados estudados, BGS e bica corrida reciclada, oriundos da região de Americana, localizada no estado de São Paulo, em camadas de pavimentos de tráfego leve em substituição do agregado convencional. Para esta identificação os parâmetros analisados no estudo paramétrico foram:

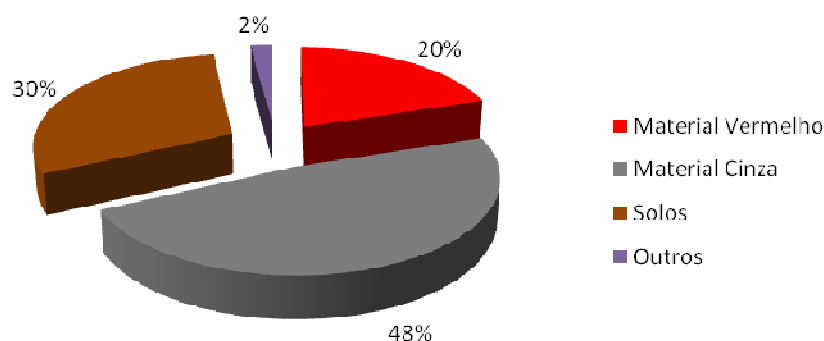
- a) Os resultados obtidos no programa experimental de laboratório se atendem as especificações da norma brasileira de agregados reciclados utilizados em camadas de pavimentos urbanos;
- a) As quantidades de resíduos de construção civil gerados na região de Americana e recebidos na usina Cemara;
- b) A capacidade de produção da usina de reciclagem de Americana;
- c) Custos por m^3 dos agregados reciclados e convencionais
- d) Custo da execução da camada de base utilizando o agregado convencional e o reciclado.

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios realizados para se alcançar os objetivos desta pesquisa.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES DOS AGREGADOS RECICLADOS

A Figura 4.1 apresenta as porcentagens em massa de cada um dos tipos de materiais contidos na amostra de RCC estudado nesta pesquisa. É possível verificar na Figura 4.1 que os materiais cimentícios (concreto, blocos de concreto, argamassa, agregados convencionais) denominados na figura como cinzas, representam a maior fração dos constituintes do material estudado.

Figura 4.1 – Porcentagem média dos constituintes do entulho da região de Americana



As porcentagens das frações de cada constituinte do resíduo sólido da construção civil são reflexos das práticas locais de construção e demolição, portanto, as características qualitativas

dos RCC's de Americana refletem a diversidade de matérias-primas, métodos e técnicas utilizadas nesta região.

A proporção de material passando na peneira 4,76 mm, denominado genericamente de solo, e que corresponde a 30%, proporciona um melhor travamento entre os agregados graúdos (diâmetro acima de 4,76 mm), diminuindo o volume de vazios e tornando a mistura mais densa. O aumento da densidade do material compactado proporciona um aumento da resistência e a diminuição da permeabilidade.

A quantidade total em massa de materiais contaminantes do resíduo analisado foi de 2,0%, sendo que, a porcentagem refere-se apenas à fração graúda retida na peneira 4,8 mm. A norma NBR 15115 (ABNT, 2004), estabelece limite de 3% para materiais de diferentes origens em massa total, ou seja, considerando também a parcela fina. Portanto, os agregados reciclados estudados atendem ao requisito da NBR 15115 (ABNT, 2004) para materiais de diferentes origens.

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO

4.2.1 Índice de Forma

De acordo com o DNER (DNIT, 1996), a forma de um agregado caracteriza-se por sua feição exterior relacionada às suas dimensões, podendo ser lamelar, esférica, alongada ou cúbica, e também os seus tipos de cantos e arestas (anguloso ou arredondado). Na Tabela 4.2 apresenta-se o resultado obtido no ensaio de índice de forma das amostras estudadas.

Tabela 4.1 – Resultado do ensaio de índice de forma dos agregados reciclados estudados

Amostra	Material	Grãos cúbicos (%)	Grãos Lamelares (%)	Grãos Alongados (%)
01	Bica Corrida reciclada	88	12	0
02	BGS reciclada	80	16	4

De acordo com a Tabela 4.1 verifica-se que para as amostras analisadas, existe uma predominância de grãos com a forma cúbica, e que as porcentagens encontradas nas amostras de grãos lamelares, atendem as recomendações das normas NBR 15115 (ABNT, 2004) e a PMSP/SP ETS-001 (PMSP, 2003) de no máximo 30% de grãos lamelares. A forma externa dos agregados é fator importante a definir suas propriedades e comportamento sob a ação do tráfego, a forma ideal dos agregados é a cúbica, que conduz a um melhor entrosamento entre os grãos, produzindo maior travamento.

Verificou-se visualmente durante a realização do ensaio que existe uma relação da forma do grão com a origem do material: grãos de forma cúbica são na maioria das vezes de natureza cimentícia ou rochosa; e os grãos lamelares e alongados são na maioria das vezes de natureza de materiais cerâmicos, conforme ilustra a Figura 4.2. Essa relação também foi encontrada na pesquisa de Leite (2007) com os materiais reciclados de Santo André.

Figura 4.2 - Forma dos Grão dos agregados reciclados da região de Americana



4.2.2 Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados conforme apresentado no item 3.2.3, na energia do Proctor intermediário, com vistas à avaliação de suas características mecânicas para emprego dos agregados reciclados em camadas de sub-base e base de pavimentos, conforme especificação da NBR 15115 (ABNT, 2004). O ensaio de compactação, além de determinar a

massa específica máxima seca e a umidade ótima, foi analisada a influência da compactação na granulometria das amostras estudadas em laboratório.

Conforme apresentado nas Figuras 4.3 e 4.4, os valores obtidos da massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo nos ensaios de compactação Proctor foram respectivamente, $1,870 \text{ g/cm}^3$ e 14% para a amostra de Bica corrida, e $1,900 \text{ g/cm}^3$ e 12,2% para a BGS reciclada. Para fins de comparação, a Tabela 4.2 apresenta os resultados de compactação com agregados reciclados encontrados por alguns autores.

Figura 4.3 - Curva de compactação da amostra bica corrida reciclada da região de Americana

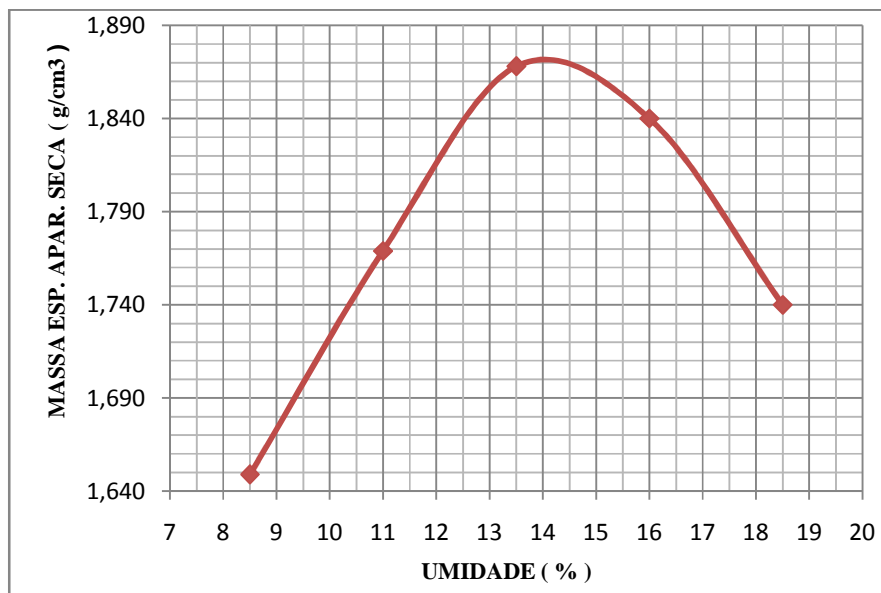


Figura 4.4 - Curva de compactação da amostra BGS reciclada da região de Americana

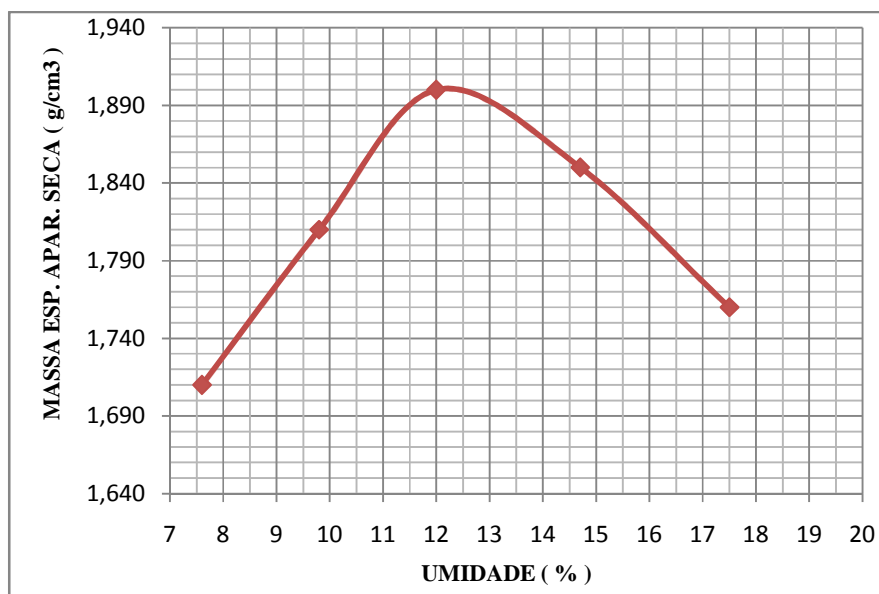


Tabela 4.2 - Valores encontrados nos ensaios de compactação com agregados reciclados mistos

Procedência	Composição agregado reciclado	Energia de Compactação	Teor de umidade de compactação (%)	Massa esp. ap. seca (g/cm ³)	Autor
Limeira	Misto	Intermediária	12,6	1,842	SILVA (2008)
Santo André São Paulo	Misto	Intermediária	14,6	1,760	LEITE (2007)
Uberlândia	Misto	Intermediária	9,3	1,980	MOREIRA et al. (2006)
São Paulo	Misto	Intermediária	11,0	1,830	MOTTA (2005)
Rio de Janeiro	Misto	Intermediária	13,8	1,830	FERNANDES (2004)

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.2, é possível verificar similaridade nos valores obtidos nos ensaios de compactação das amostras de bica corrida e BGS reciclados de RCC da região de americana, apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4, com os encontrados por outros pesquisadores.

4.2.3 Ensaio de Índice Suporte Califórnia

Para determinar os valores dos CBR foram preparados oito corpos de prova na energia intermediária: três corpos de prova com a bica corrida reciclada de RCC, com umidade aproximadamente 14%, para as idades de ensaios 4 e 28 dias, e cinco corpos de prova do BGS reciclado, com umidade de aproximadamente 12%, para as idades de ensaio 4, 28 e 90 dias. Os resultados dos ensaios de Índice Suporte Califórnia e da expansão podem ser analisados na Tabela 4.3.

Os valores apresentados na Tabela 4.3 apresentam variabilidade, justificados pela heterogeneidade do agregado reciclado de RCC. Além disso, os agregados reciclados estudados possuem uma quantidade considerável de fração de pedregulhos, o que pode implicar em valores altos de CBR, caso um agregado grande fique embaixo do pistão dificultando a penetração.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios Simultâneos de Compactação e CBR

Amostra	Material	Energia de compactação	Umidade de compactação	Idade do Ensaio CBR	CBR (%)	Expansão (%)
01	Bica Corrida RCC Misto	Intermediaria	14,6	4 dias (*)	24,7	0
01	Bica Corrida RCC Misto	Intermediaria	14,2	28 dias	58,0	0
02	Bica Corrida RCC Misto	Intermediaria	14,2	28 dias	80,0	0
01	BGS Reciclada de RCC Misto	Intermediaria	12,5	4 dias (*)	72,0	0
01	BGS Reciclada de RCC Misto	Intermediaria	12,2	28 dias	90,0	0
02	BGS Reciclada de RCC Misto	Intermediaria	11,9	28 dias	85,0	0
01	BGS Reciclada de RCC Misto	Intermediaria	12,0	90 dias	80,0	0
02	BGS Reciclada de RCC Misto	Intermediaria	12,2	90 dias	96,5	0

(*) ensaio de acordo com a norma - 4 dias em imersão na água.

Os valores de CBR das amostras de bica corrida reciclada de RCC da região de Americana foram de 25% e 69%, para as idades de 4 e 28 dias, respectivamente. Assim, os resultados obtidos do CBR e da expansão da bica corrida reciclada, após cura de 28 dias, atendem

o mínimo exigido pela NBR 15115 (ABNT, 2004) para emprego em camada de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos urbanos.

Assim como bica corrida reciclada estudada, as amostras de BGS recicladas também apresentaram resultados satisfatórios quanto aos valores mínimos estabelecidos pela norma de agregados reciclados utilizados em camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos urbanos. Os valores dos índices de suporte Califórnia obtidas nos ensaios foram de 72%, 88%, e 88%, para as idades de 4, 28 e 90 dias, respectivamente.

Analisando a Tabela 4.3, verifica-se que há um aumento após 28 dias de cura dos valores CBR dos materiais estudados, provavelmente causados pela hidratação das partículas de cimento presentes nos agregados reciclados. Nos resultados médios de ISC obtidos nesta pesquisa, observa-se um aumento após 28 dias de cura de aproximadamente 45% na bica corrida reciclada, e no agregado reciclado denominado como BGS encontramos um crescimento de 16%.

Foram realizados ensaios de ISC após 90 dias de cura com material BGS reciclado. Comparando os resultados médios obtidos neste material nos ISC de 28 e 90 dias, não encontramos crescimentos dos valores, possivelmente, as reações pozolânicas ocorreram no período inicial

Comparando os crescimentos após cura de 28 dias dos materiais estudados, levantamos algumas hipóteses do aumento superior no material estudado bica corrida reciclada: o valor da umidade ótima é maior possibilitando um processo de hidratação mais efetivo das partículas de cimento presentes neste material, e ou, a maior quantidade de materiais cúbicos na bica corrida, que são na maioria das vezes, de natureza cimentícia, conseqüentemente, maior fração de material para possível processo de hidratação e ganho de resistência a penetração após cura.

A expansibilidade quase nula dos agregados reciclados é uma grande vantagem para sua aplicação em camadas de pavimentos. Para fins de comparação, a Tabela 4.4 apresenta os resultados CBR encontradas na bibliografia consultada com agregados reciclados.

Tabela 4.4 - Valores de CBR encontrados na bibliografia consultada

Procedência	Composição agregado reciclado	Energia de Compactação	Umidade de compactação	CBR (%)	Autor
Limeira	Misto	Intermediária			SILVA (2008)
Santo André	Misto	Intermediária	14,6	73	LEITE (2007)
Goiânia	Misto	Intermediária	14,5	88	MENDES et al. (2004)
São Paulo	Misto	Intermediária	11,0	75	MOTTA (2005)

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.4 pode-se concluir que os ISC obtidos para o agregado reciclado estudado denominado BGS da região de Americana são próximos aos valores verificados em outros trabalhos para agregados mistos. No caso da bica corrida reciclada o valor obtido no ensaio normal sem cura da amostra foi inferior aos valores encontrados em outros trabalhos.

Em função da heterogeneidade do agregado reciclado, conseqüentemente, das variações nos ensaios de índice suporte Califórnia, recomenda-se que o comportamento mecânico do agregado reciclado de resíduos de construção civil seja também avaliado através dos ensaios triaxiais de carga cíclica.

4.2.4 Análise Granulométrica

Os ensaios foram realizados conforme apresentado no item 3.2.2, por peneiramento e sedimentação, com amostras de agregados antes e após compactação, devido o agregado reciclado ser suscetível à quebra pelo processo de compactação. Após a compactação o material foi retirado do corpo de prova, levemente destorroado e submetido ao ensaio de granulométrica por peneiramento e sedimentação.

Segundo DNER (1996) a graduação do agregado, representada pela curva de distribuição granulométrica, é uma das características que assegura a estabilidade aos pavimentos. A distribuição contínua é a que os grãos menores promovem um melhor embricamento com os

grãos maiores. A NBR 15115 (ABNT, 2004) especifica que o Coeficiente de não Uniformidade, que é a relação entre os diâmetros que correspondem a 60% e 10% passantes na curva granulométrica, deve ser maior ou igual a 10. Quanto maior o valor do coeficiente de não uniformidade mais bem- graduado é considerado o material.

Foram realizados os ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, conseqüentemente foram obtidos os diâmetros correspondentes as porcentagens passantes de 10% e 60%, os quais são utilizados no cálculo do coeficiente de não uniformidade (Cnu) do material. O coeficiente de não uniformidade da bica corrida de RCC antes e após a compactação, obtidos nesta pesquisa foram respectivamente, 86 e 157, e da BGS reciclada antes e após a compactação, > 100 e 82. Portanto, as curvas granulométricas dos agregados reciclados estudados nesta pesquisa, atenderam as especificações das normas NBR 15115 (ABNT, 2004) e a ETS-001 (PMSP, 2003), $C_u \geq 10$.

A Tabela 4.5 e a Figura 4.5 apresentam os resultados obtidos no ensaio, com agregados reciclados denominados Bica Corrida Reciclada antes e após a compactação, e a Tabela 4.6 e a Figura 4.6 apresentam os resultados obtidos nos ensaios do BGS Reciclado.

Figura 4.5 – Curvas granulométricas antes e após a compactação da Bica Corrida reciclada de RCC da região de Americana

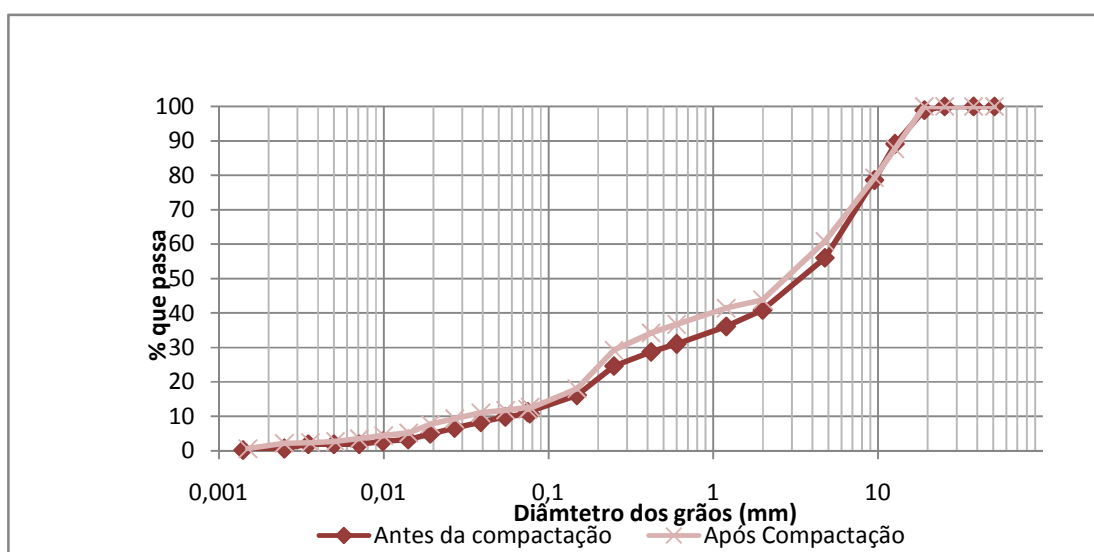


Tabela 4.5 – Resultados análise Granulométricas antes e após a compactação da Bica Corrida Reciclada

Análise Granulométrica por Peneiramento e sedimentação			
Antes da Compactação do material		Após a compactação do material	
Peneiras	% que passa	Peneiras	% que passa
1" (25,4 mm)	100,0	1" (25,4 mm)	100,0
3/4 " (19,1 mm)	98,9	3/4 " (19,1 mm)	100,0
1/2" (12,7mm)	89,1	1/2" (12,7mm)	87,7
3/8" (9,52mm)	78,6	3/8" (9,52mm)	79,3
n.º 4 (4,76mm)	56,0	n.º 4 (4,76mm)	60,8
n.º 10 (2,00mm)	40,9	n.º 10 (2,00mm)	43,8
n.º 16 (1,2mm)	36,1	n.º 16 (1,2mm)	41,4
n.º 30 (0,6mm)	31,0	n.º 30 (0,6mm)	36,7
n.º 40 (0,42mm)	28,7	n.º 40 (0,42mm)	34,2
n.º 60 (0,25mm)	24,6	n.º 60 (0,25mm)	29,2
n.º 100 (0,149mm)	16,1	n.º 100 (0,149mm)	18,0
n.º 200 (0,075mm)	11,2	n.º 200 (0,075mm)	12,0
0,0771 mm	10,8	0,0774 mm	12,7
0,0547 mm	9,9	0,0549 mm	11,8
0,0389 mm	8,3	0,0390 mm	11,0
0,0269 mm	6,6	0,0270 mm	9,3
0,0192 mm	4,9	0,0192 mm	7,7
0,0141 mm	3,3	0,0142 mm	5,2
0,0099 mm	2,7	0,0100 mm	4,4
0,0070 mm	1,9	0,0071 mm	3,5
0,0050 mm	1,9	0,0051 mm	2,7
0,0035 mm	1,9	0,0036 mm	2,4
0,0025 mm	0,6	0,0025 mm	2,2
0,0014 mm	0,2	0,0015 mm	0,6

Figura 4.6 – Curvas granulométricas antes e após a compactação da BGS reciclada de RCC da região de Americana

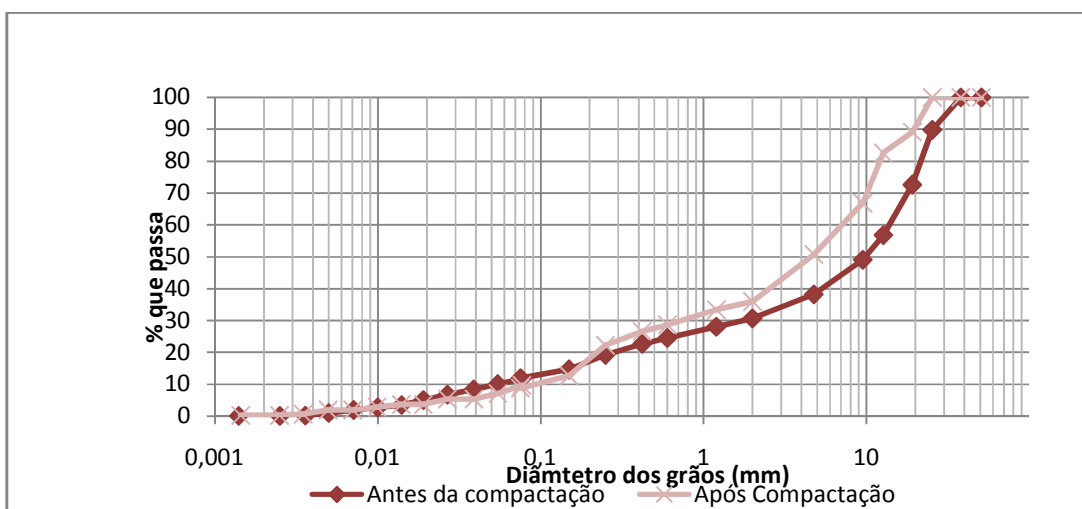


Tabela 4.6 – Resultados análise Granulométricas antes e após a compactação da BGS Reciclado

Análise Granulométrica por Peneiramento e sedimentação			
Antes da Compactação do material		Após a compactação do material	
<i>Peneiras</i>	<i>% que passa</i>	<i>Peneiras</i>	<i>% que passa</i>
<i>1 1/2" (38,1mm)</i>	100,0	<i>1 1/2" (38,1mm)</i>	100,0
<i>1" (25,4 mm)</i>	89,8	<i>1" (25,4 mm)</i>	100
<i>3/4 " (19,1 mm)</i>	72,6	<i>3/4 " (19,1 mm)</i>	89,1
<i>1/2"(12,7mm)</i>	56,8	<i>1/2"(12,7mm)</i>	82,5
<i>3/8" (9,52mm)</i>	49,1	<i>3/8" (9,52mm)</i>	66,8
<i>n.º 4 (4,76mm)</i>	38,2	<i>n.º 4 (4,76mm)</i>	50,7
<i>nº 10 (2,00mm)</i>	30,7	<i>nº 10 (2,00mm)</i>	36,0
<i>nº 16 (1,2mm)</i>	28,0	<i>nº 16 (1,2mm)</i>	33,4
<i>nº 30 (0,6mm)</i>	24,5	<i>nº 30 (0,6mm)</i>	28,6
<i>nº 40 (0,42mm)</i>	22,7	<i>nº 40 (0,42mm)</i>	26,6
<i>nº 60 (0,25mm)</i>	19,2	<i>nº 60 (0,25mm)</i>	22,2
<i>nº 100 (0,149mm)</i>	14,6	<i>nº 100 (0,149mm)</i>	15,8
<i>nº 200 (0,075mm)</i>	11,9	<i>nº 200 (0,075mm)</i>	12,5
<i>0,0764 mm</i>	11,6	<i>0,0763 mm</i>	12,0
<i>0,0544 mm</i>	10,0	<i>0,0547 mm</i>	11,6
<i>0,0387 mm</i>	8,4	<i>0,0389 mm</i>	9,2
<i>0,0268 mm</i>	6,7	<i>0,0268 mm</i>	7,8
<i>0,0191 mm</i>	5,1	<i>0,0191 mm</i>	6,7
<i>0,0140 mm</i>	3,5	<i>0,0139 mm</i>	4,2
<i>0,0100 mm</i>	2,7	<i>0,0099 mm</i>	2,9
<i>0,0071 mm</i>	1,9	<i>0,0070 mm</i>	2,0
<i>0,0050 mm</i>	1,0	<i>0,0050 mm</i>	2,0
<i>0,0036 mm</i>	0,2	<i>0,0035 mm</i>	0,6
<i>0,0025 mm</i>	0,1	<i>0,0025 mm</i>	0,2
<i>0,0014 mm</i>	0,1	<i>0,0014 mm</i>	0,2

Analisando-se as Figuras 4.5 e 4.6 é possível verificar uma mudança no diâmetro nominal dos grãos em relação à curva antes e após a compactação. No processo da compactação as partículas quebraram aumentando fração de finos, alterando as porcentagens passantes em todas as peneiras utilizadas e as porcentagens dos diâmetros dos grãos no ensaio de sedimentação.

A análise da degradação do material após a compactação é muito importante, pois durante a aplicação e compactação ocorrem alterações. Assim, um agregado reciclado que não atende as especificações de projeto antes da compactação, poderá após a quebra tornar-se de acordo com o especificado.

Apesar da mudança granulométrica após compactação, as amostras de bica corrida e BGS reciclados de RCC da região de Americana, atenderam a norma NBR 15115 (ABNT, 2004) de agregados reciclados para emprego em pavimentação. Segundo esta norma a porcentagem de material passante na peneira 0,42 mm, deve ficar entre 10% e 40%, visando garantir uma quantidade mínima de material fino no montante de agregado reciclado, promovendo um maior embricamento dos grãos graúdos.

Verifica-se nas Figuras ilustradas 4.5 e 4.6, que as amostras estudadas de bica corrida e BGS reciclados de RCC apresentaram respectivamente, porcentagens que passam na peneira 0,42 mm, os valores de aproximadamente 29% e 23% antes da compactação, e 34% e 27% após a compactação. Portanto, os materiais estudados antes da compactação atendem as especificações da norma.

A NBR 15115 (ABNT, 2004) também prescreve que o agregado reciclado deve ter uma dimensão característica máxima de 63,5 mm. Nas Tabelas 4.5 e 4.6 verifica-se que os materiais estudados da região de Americana passa totalmente pela peneira de 38,1 mm, atendendo aos critérios de dimensão máxima da norma para utilização em camadas de pavimentos. A norma dos agregados reciclados não preconiza faixas granulométricas para aplicação nas camadas de pavimentos.

4.2.5 Resultados dos ensaios de Módulo de resiliência

Os módulos de resiliência foram determinados através de ensaios triaxiais cíclicos, de acordo com os procedimentos da norma DNER-ME 134 (DNIT, 2010), empregada em solos para pavimentação. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Escola Politécnica da USP.

O valor do módulo de resiliência pode ser influenciado pela origem e composição do material, pelo estado de tensão e a condição de carregamento, e pelo estado físico da amostra, definida pelo teor de umidade e massa específica seca.

Para determinar os módulos de resiliência após cura de 4, 56 e 90 dias foram moldados seis corpos de prova de prova de 150 mm x 300 mm: três corpos de provas de bica corrida reciclada compactados na energia intermediária com umidade de aproximadamente 14%, e três de BGS reciclado também compactados na energia intermediária com umidade de aproximadamente 12%.

Inicialmente, com os resultados obtidos nos ensaios triaxiais de carga repetida foram comparados o desempenho de três modelos matemáticos, que são os mais usuais, na representação do módulo de resiliência em função do estado de tensão. A Tabela 3.5 apresentou os modelos genéricos considerados neste estudo. A adequação do modelo em explicar as variações observadas na variável dependente (módulo de resiliência) em função das variações nas variáveis independentes (estado de tensão) foi avaliada a partir do coeficiente de determinação (R^2).

A Tabela 4.7 e a Tabela 4.8 apresentam os resultados da modelagem do módulo de resiliência com o estado de tensão, respectivamente para a brita graduada simples reciclada e a bica corrida reciclada, e os diferentes períodos de cura. Ressalta-se que a modelagem foi realizada considerando-se tanto o módulo de resiliência quanto as tensões confinante e desvio em MPa.

Analisando-se a Tabela 4.7 e a Tabela 4.8 verifica-se que, independentemente do material e do período de cura, o modelo composto apresentou os maiores valores de coeficiente de determinação, indicando o melhor ajuste na representação das variações do módulo de resiliência com o estado de tensão se comparado aos modelos potenciais de tensão confinante e tensão desvio.

Os valores de coeficiente de determinação do modelo composto são todos superiores a 0,92, indicando o ótimo desempenho deste modelo ao explicar as variações do módulo de

resiliência. Dessa forma, para desenvolvimento deste trabalho adotar-se-á o modelo composto para as análises subsequentes.

Tabela 4.7 – Resultados da modelagem do módulo de resiliência em função do estado de tensão para a BGS reciclada

Período de cura	Modelo	k₁	k₂	k₃	R²
4 dias	Modelo composto (k- σ_3 - σ_d)	277	0,18	0,18	0,93
	Tensão confinante (k- σ_3)	294	0,35	--	0,78
	Tensão desvio (k- σ_d)	207	--	0,29	0,80
56 dias	Modelo composto (k- σ_3 - σ_d)	1439	0,56	0,21	0,97
	Tensão confinante (k- σ_3)	1180	0,65	--	0,88
	Tensão desvio (k- σ_d)	561	--	0,49	0,76
90 dias	Modelo composto (k- σ_3 - σ_d)	977	0,46	0,17	0,99
	Tensão confinante (k- σ_3)	961	0,58	--	0,93
	Tensão desvio (k- σ_d)	501	--	0,45	0,83

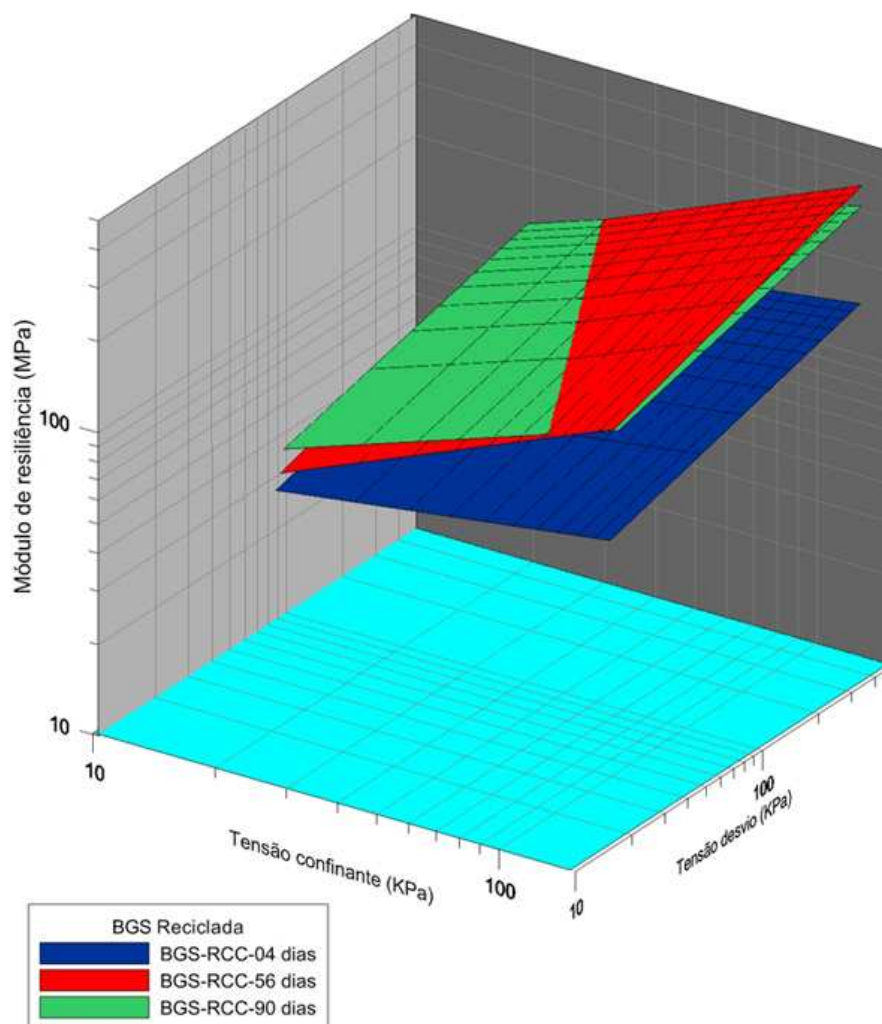
Tabela 4.8 – Resultados da modelagem do módulo de resiliência em função do estado de tensão para a Bica corrida reciclada

Período de cura	Modelo	k₁	k₂	k₃	R²
4 dias	Modelo composto (k- σ_3 - σ_d)	284	0,21	0,17	0,96
	Tensão confinante (k- σ_3)	311	0,38	---	0,86
	Tensão desvio (k- σ_d)	211	---	0,31	0,86
56 dias	Modelo composto (k- σ_3 - σ_d)	569	0,55	0,13	0,95
	Tensão confinante (k- σ_3)	450	0,56	---	0,87
	Tensão desvio (k- σ_d)	233	---	0,42	0,73
90 dias	Modelo composto (k- σ_3 - σ_d)	330	0,38	0,15	0,92
	Tensão confinante (k- σ_3)	293	0,45	---	0,82
	Tensão desvio (k- σ_d)	180	---	0,36	0,76
105 dias	Modelo composto (k- σ_3 - σ_d)	236	0,07	0,31	0,98
	Tensão confinante (k- σ_3)	277	0,37	---	0,73
	Tensão desvio (k- σ_d)	210	---	0,34	0,95

Ainda analisando a Tabela 4.7 e a Tabela 4.8, não foi possível estabelecer um padrão de comportamento para os coeficientes de regressão k_1 , k_2 e k_3 . Contudo, parece haver uma tendência de aumento de influência da tensão confinante com o aumento do tempo de cura.

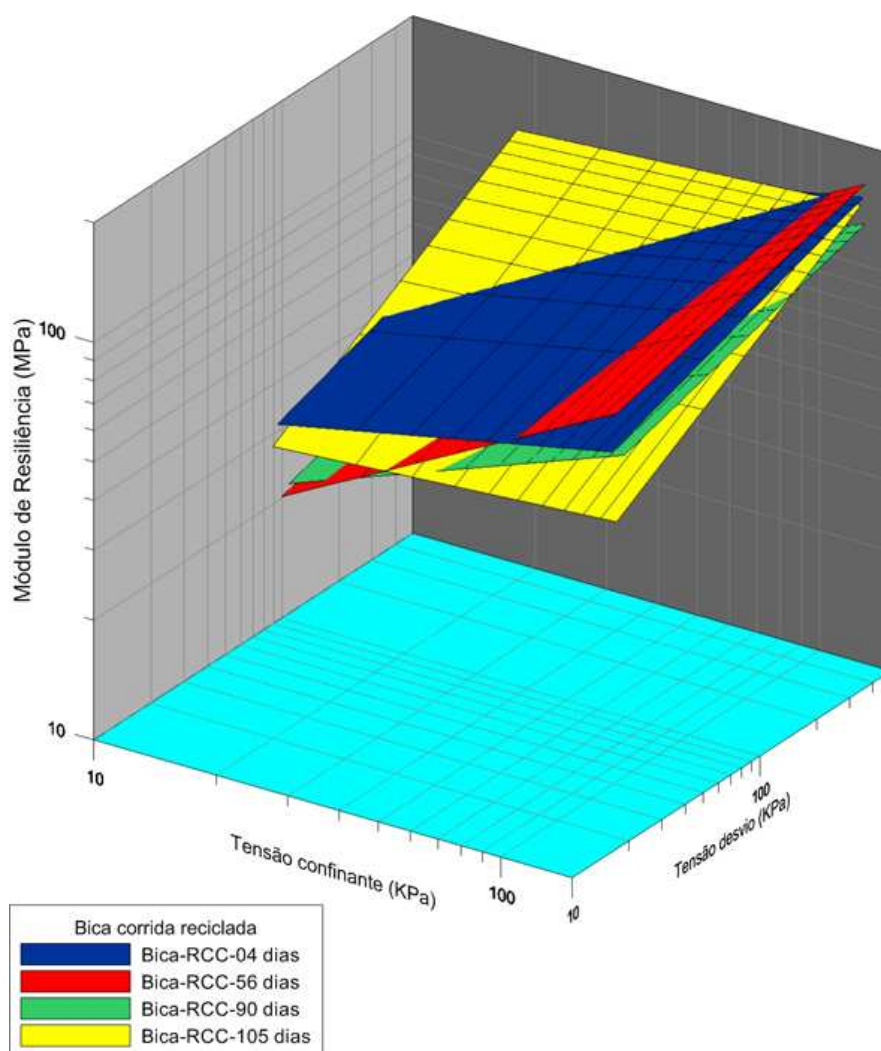
A Figura 4.7 mostra a variação do módulo de resiliência com o estado de tensão, para os diferentes períodos de cura, obtida do modelo composto para a BGS reciclada. Ressalta-se que nesta representação as tensões confinante e desvio são representadas em KPa para melhor visualização.

Figura 4.7 – Representação gráfica da variação do módulo de resiliência da BGS reciclada em função do estado de tensão e do tempo de cura obtida a partir do modelo composto



A Figura 4.8 mostra a variação do módulo de resiliência com o estado de tensão, para os diferentes períodos de cura, obtida do modelo composto para a bica reciclada. Ressalta-se que nesta representação as tensões confinante e desvio são representadas em KPa para melhor visualização.

Figura 4.8 – Representação gráfica da variação do módulo de resiliência da Bica reciclada em função do estado de tensão e do tempo de cura obtida a partir do modelo composto

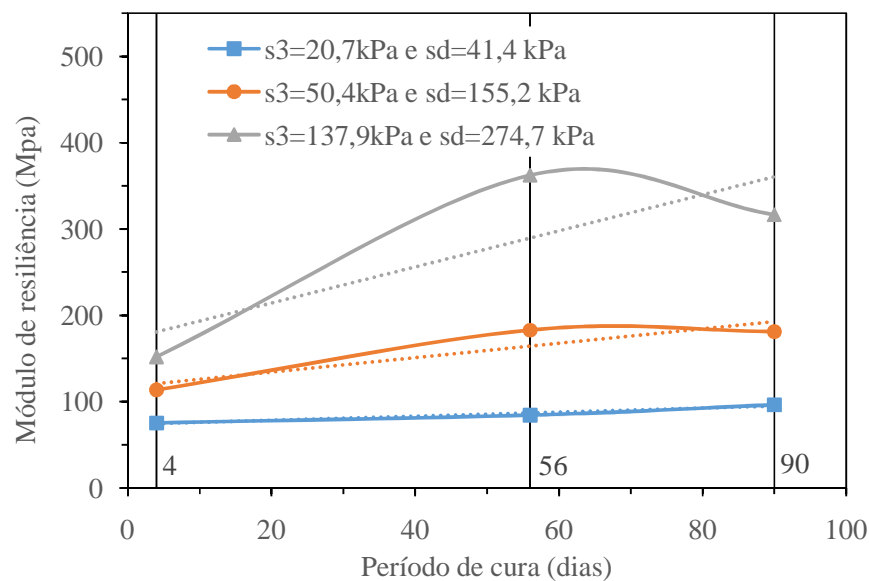


Analisando-se as Tabelas 4.7 e 4.8 e as figuras 4.7 e 4.8, observa-se que há uma tendência de aumento do módulo de resiliência com as tensões confinantes e desvio. A exemplo do que

ocorreu com o CBR, as possíveis reações pozolânicas ocorridas ao longo do período de cura, produziram uma tendência de aumento do MR, e, conseqüentemente, da rigidez do material.

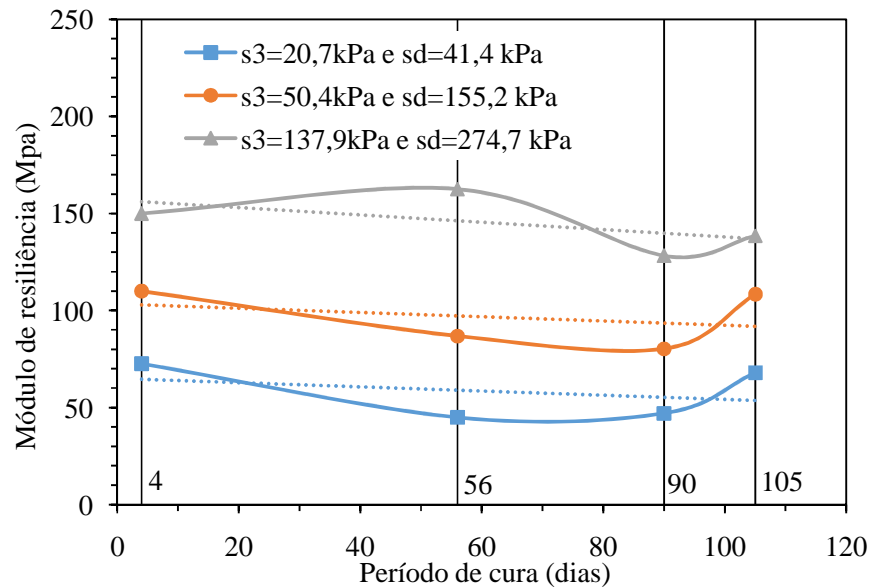
A Figura 4.7 permite observar uma tendência de aumento do módulo de resiliência com o período de cura da BGS reciclada. No caso da bica reciclada, parece haver uma tendência de inversão do comportamento, com a redução do módulo de resiliência com o aumento do tempo de cura. Para melhor observar essa tendência foram construídas as Figuras 4.9 e 4.10 que mostram o valor do módulo de resiliência para três estados de tensão, um no início da sequência de ensaio, uma no centro e uma no final. Assim, considerando o modelo composto determinado em cada caso, foram calculados os valores de módulo de resiliência para os pares de tensão: $\sigma_3 = 20,7$ kPa e $\sigma_d = 41,4$ kPa, $\sigma_3 = 50,4$ kPa e $\sigma_d = 155,2$ kPa e $\sigma_3 = 137,9$ kPa e $\sigma_d = 274,4$ kPa.

Figura 4.9 – Variação do módulo de resiliência da BGS reciclada com o período de cura para três pares de tensão



Analisando-se a Figura 4.9, observa-se, conforme discutido anteriormente, a tendência de aumento do módulo de resiliência com o estado de tensão. Para o estado de tensão central, o MR aos 56 dias e 90 dias são, em média, 60% maiores que o observado aos 4 dias. Analisando-se a Figura 4.10, observa-se, conforme discutido anteriormente, a tendência de redução do módulo de resiliência com o estado de tensão para todas as sequencias analisadas, ou estabilidade do MR.

Figura 4.10 – Variação do módulo de resiliência da BGS reciclada com o período de cura para três pares de tensão



4.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Adotamos nos dimensionamentos das estruturas dos pavimentos deste trabalho o número de operações equivalentes no eixo de 80kN igual a 10^5 , determinado nas Diretrizes para instruções de projetos e execução de pavimentação urbana do município de Americana - SP, de 22 de Abril de 2009, com via de tráfego leve, com função predominante de via local e Secundaria, com uma vida de projeto para 10 anos.

O valor do ISC utilizado no dimensionamento do pavimento do agregado convencional é o padrão de referência do ensaio de 100% de uma brita graduada de elevada qualidade. O trabalho utilizou nos dimensionamentos dos pavimentos propostos um solo de subleito com valor de CBR de 10%. A camada de revestimento asfáltico, do tipo CAUQ, de acordo com o método

de dimensionamento do DNIT, para uma via de tráfego leve com 10^5 solicitações do eixo padrão deve ser constituída com uma espessura mínima de 5,0 cm.

O coeficiente estrutural da sub-base granular do agregado reciclado utilizado na pesquisa foi obtido da equação 4.1, conforme IP 04 - Instrução para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Leve e Médio da Prefeitura de São Paulo (PMSP - IP04, 2004).

$$K_{SB} = \sqrt[3]{\frac{CBR_{SB}}{3CBR_{SL}}} \leq 1 \quad \text{Equação 4.1}$$

onde:

K_{SB} : coeficiente de equivalência estrutural da sub-base, reforço e subleito de agregado reciclado;

CBR_{SB} : são os suportes da sub-base, reforço e subleito de agregado reciclado;

CBR_{SL} : são os suportes do subleito.

Com a expressão matemática apresentada no capítulo 3, equação 3.7, e o gráfico da família de curvas de dimensionamento ilustrado na Figura 3.9, considerando os resultados obtidos nos ensaios de Índice Suporte Califórnia (ISC ou CBR) dos agregados reciclados estudados e o valor adotado do CBR do subleito, determinou-se as espessuras das camadas de dois tipos de pavimentos propostos na pesquisa, conforme apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12.

A norma de execução das camadas dos pavimentos utilizando agregados reciclados NBR 15115 (ABNT, 2004) especifica que no momento da compactação das camadas a espessura máxima da camada deverá ser de 20 cm e a mínima de 10 cm. Além disso, os ensaios de campo para verificar o grau de compactação da camada granular, pelo método do frasco de areia, são realizados com uma espessura de 15 cm. Assim, neste trabalho foram redimensionadas as estruturas do pavimento de acordo com as especificações da NBR 15115 e execução de campo da compactação e liberação destas camadas:

- ✓ Dimensionamento da estrutura do pavimento proposto tipo 1 utilizando a bica corrida reciclada na camada de sub-base e o BGS reciclado na base: revestimento espessura de 5 cm; base espessura de 11cm; e sub-base espessura de 13cm;

- ✓ Dimensionamento da estrutura do pavimento proposto tipo 2 utilizando o BGS reciclado na base e na sub-base: revestimento espessura de 5cm; base espessura de 11cm e sub-base de espessura de 12cm.

As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram as estruturas propostas do pavimento urbano de tráfego leve pelo método do DNER. Foram estudados dois tipos de estruturas: pavimento tipo 1, com camada de revestimento, base e sub-base; e outra pavimento tipo 2, com camada de revestimento e de base.

Figura 4.11 - Perfil do pavimento proposto tipo 1 utilizando a bica corrida reciclada na camada de sub-base e o BGS reciclado na base

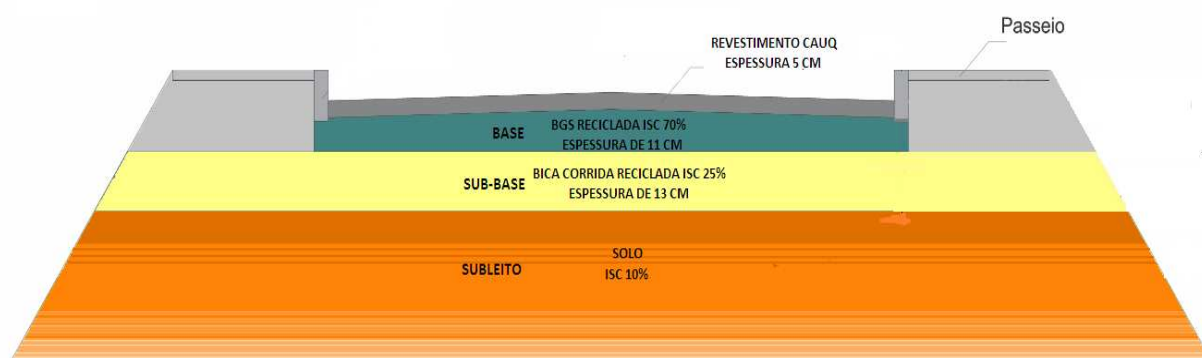
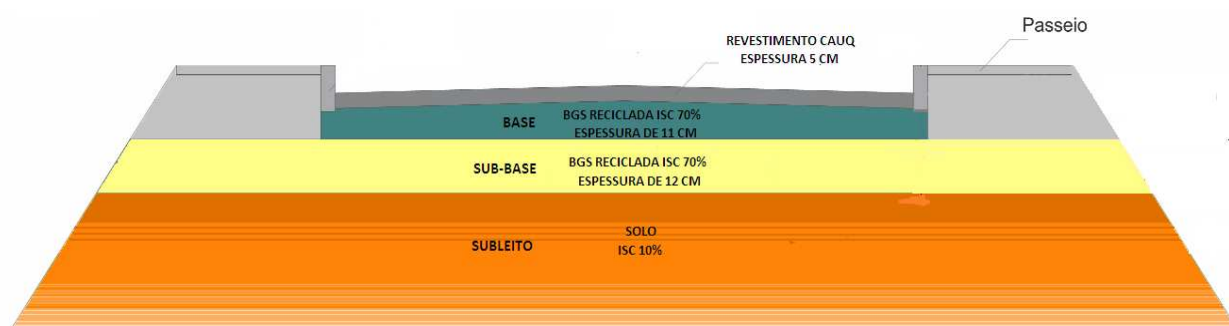


Figura 4.12 - Perfil do pavimento proposto tipo 2 utilizando o BGS reciclado na base e sub-base



O resultado médio do CBR da bica corrida após 28 dias de cura foi 70%, atendendo a especificação da NBR 15115 (ABNT, 2004) como material para base de pavimentos leves. No caso da aplicação deste material substituindo o BGS reciclado na camada de base, é importante

simular em campo o mesmo procedimento de cura de 28 dias após compactação da camada, assim como, monitorar e avaliar a estrutura do pavimento ao longo do tempo.

Para realizar a análise da viabilidade técnica e econômica da utilização do agregado reciclado substituindo o convencional, foram dimensionados os dois tipos de pavimentos utilizando uma brita graduada simples.

No dimensionamento de pavimentos pelo método do DNER, mesmo que o CBR da Sub-base seja superior a 20%, a espessura do pavimento necessário para protegê-la é determinada como se esse valor fosse 20% e, por esta razão, nos cálculos da equação 3.7 utilizando o padrão de referência do ensaio de CBR 100% de uma brita graduada convencional, alteram-se apenas os valores dos coeficientes de equivalência estrutural do agregado convencional. As estruturas dimensionadas utilizando o agregado convencional foram:

- ✓ Estrutura do pavimento proposto tipo 1 utilizando agregados convencionais nas camadas de sub-base e base: revestimento espessura de 5cm; base espessura de 11cm; e sub-base espessura de 12cm;
- ✓ Estruturado pavimento proposto tipo 2 utilizando BGS convencional na camada de base: revestimento espessura de 5cm; base espessura de 11cm e sub-base de espessura de 12cm.

Comparando as estruturas dimensionadas nos dois tipos de pavimentos propostos, utilizando agregados convencionais e reciclados, observa-se uma pequena diferença de 1cm espessura na camada de sub-base utilizando agregados reciclados do pavimento tipo 1.

4.4 ESTUDO PARAMÉTRICO

Os materiais estudados no presente trabalho são oriundos da região de Americana. O município de Americana está localizado no interior do estado de São Paulo, os agregados convencionais são tipicamente utilizados na construção das camadas de base e sub-base dos pavimentos urbanos. Em 2008 foi implantada uma usina de reciclagem de resíduos de construção

civil neste município, a Cemara Pró-Ambiental, tornando-se potencial fornecedor de agregados reciclados para o setor da construção civil, recebendo mais de 800 toneladas de entulho de construção civil por dia, reciclando 95%.

Além da disponibilidade de agregados reciclados na região de Americana, conforme citado anteriormente, o município de Americana publicou em 2005 a Lei nº 4.198 (8/07/2005) que institui no município o sistema de Gestão sustentável de resíduos da construção civil e resíduos volumosos. Ainda neste mesmo contexto, no ano de 2008, o município publicou o decreto nº 7.730 (12/07/2008) que dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas do município.

Conforme resultados apresentados no capítulo 3 deste trabalho, os materiais estudados nesta pesquisa atenderam aos requisitos da NBR 15115 (ABNT, 2004). De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de índice suporte Califórnia e com as especificações de NBR 15115 (ABNT, 2004), os agregados estudados podem ser utilizados em camada de base e sub-base o BGS reciclado, e em sub-base a bica corrida reciclada.

A análise de viabilidade econômica foi realizada utilizando as tabelas de custos da Prefeitura de São Paulo de janeiro de 2013, pois não foi possível aquisição destes dados junto à prefeitura do município de Americana, e a publicação do valor de mercado do material estudado no trabalho. A Tabela 4.9 apresenta os valores do m³ do agregado reciclado e da brita graduada convencional.

Tabela 4.9 – Tabela de custos da Prefeitura de São Paulo de janeiro de 2013

Insumo	Valor R\$/ m³
Agregado reciclado (diversas granulometrias)	39,50
Brita graduada convencional	74,58
Bica corrida convencional	72,55

Observa-se nos valores apresentados na Tabela 4.9, que o valor da brita graduada convencional é aproximadamente 89% maior comparado ao custo do agregado reciclado. As composições de preços da execução da camada de base utilizando agregado reciclado e convencional são apresentadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Composição de preços da execução da camada de base de acordo com a Tabela de custos da Prefeitura de São Paulo de janeiro de 2013

Nome do Serviço	Camada de Base e Sub-base (m ³)								
	Agregado reciclado			Brita graduada Convencional			Bica Corrida Convencional		
	Preço	Coefic.	Total	Preço	Coefic.	Total	Preço	Coefic.	Total
Servente (H)	11,567	0,15240	1,7628	11,567	0,15400	1,7813	11,567	0,14040	1,6240
Caminhão irrigadeira 6000L (H)	76,370	0,03640	2,7798	76,370	0,03250	2,4820	76,370	0,03640	2,7798
Motonivelador a 125 HP (H)	139,70	0,05200	7,2642	139,70	0,04650	6,4958	139,70	0,05200	7,2642
Rolo Compactador Vibratório (H)	75,530	0,05200	3,9275	75,530	0,07500	5,6646	75,530	0,05200	3,9275
Custo do insumo (M ³)	39,50	1,2500	49,375	74,58	1,2500	93,223	72,550	1,25000	90,692
Preço Total por m ³ (R\$) da execução			65,11			109,65			106,29

Analisando a Tabela 4.10, os custos de equipamentos e mão de obra para execução da construção das camadas de um determinado pavimento são os mesmos, observa-se que a variação de preço é devido ao tipo de agregado utilizado.

A Tabela 4.11 apresenta a composição dos custos para construir as camadas de base e sub-base de um trecho, com extensão de 1.000m de um pavimento urbano com largura de 7m, da estrutura obtida no dimensionamento do tipo 1: espessuras de base 11cm e sub-base 13cm utilizando os agregados reciclados; e base 11cm e sub-base 12cm empregando os agregados convencionais.

Tabela 4.11 – Composição dos custos empregando agregados reciclados e convencionais na estrutura do pavimento tipo 1

Pavimento tipo 1 Agregados reciclados		Pavimento tipo 1 Agregados convencionais	
Camadas	Valores	Camadas	Valores R\$
Camada de Base Preço total por m ³ (R\$) da execução	R\$ 65,11	Base com BGS Preço total por m ³ (R\$) da execução	109,65
Volume total de insumos para execução da camada de base (M ³)	770m ³	Volume total de insumos para execução da camada de base (M ³)	770m ³
Valor total da estrutura de base do pavimento	R\$ 50.134,70	Valor total da estrutura de base do pavimento	R\$ 84.430,50
Camada de Sub-base Preço total por m ³ (R\$) da execução	R\$ 65,11	Camada de Sub-base com bica corrida Preço total por m ³ (R\$) da execução	R\$ 106,29
Volume total de insumos para execução da camada de sub-base (M ³)	910m ³	Volume total de insumos para execução da camada de sub-base (M ³)	840m ³
Valor total da estrutura de sub-base do pavimento	R\$ 59.250,10	Valor total da estrutura de sub-base do pavimento	R\$ 89.283,6
Valor total Base e Sub-base	R\$ 109.384,80	Valor total Base e Sub-base	R\$ 173.714,10

A Tabela 4.12 apresenta a composição dos custos para construir as camadas de base e sub-base de um trecho, com extensão de 1.000m de um pavimento urbano com largura de 7m, da estrutura obtida no dimensionamento do tipo 2: espessuras de base 11cm e sub-base 13cm utilizando os agregados reciclados; e base 11cm e sub-base 12cm empregando os agregados convencionais.

Tabela 4.12 – Composição dos custos empregando agregados reciclados e convencionais na estrutura do pavimento tipo 2

Pavimento tipo 2 Agregados reciclados		Pavimento tipo 2 Agregados convencionais	
Camadas	Valores	Camadas	Valores R\$
Camada de Base Preço total por m ³ (R\$) da execução	R\$ 65,11	Base com BGS Preço total por m ³ (R\$) da execução	R\$ 109,65
Volume total de insumos para execução da camada de base (M ³)	770m ³	Volume total de insumos para execução da camada de base (M ³)	770m ³
Valor total da estrutura de base do pavimento	R\$ 50.134,70	Valor total da estrutura de base do pavimento	R\$ 84.430,50
Camada de Sub-base Preço total por m ³ (R\$) da execução	R\$ 65,11	Camada de Sub-base com BGS Preço total por m ³ (R\$) da execução	R\$ 109,65
Volume total de insumos para execução da camada de sub-base (M ³)	840m ³	Volume total de insumos para execução da camada de sub-base (M ³)	840m ³
Valor total da estrutura de sub-base do pavimento	R\$ 54.692,40	Valor total da estrutura de sub-base do pavimento	R\$ 92.106,00
Valor total Base e Sub-base	R\$ 104.827,10	Valor total Base e Sub-base	R\$ 176.536,50

Observam-se nas composições dos preços apresentadas na Tabela 4.11 e 4.12 que o agregado natural britado representa em um aumento no custo da execução das camadas dos pavimentos tipo 1 e tipo 2, respectivamente, de 59% e 68%.

Conforme item 4.2.1 do presente trabalho, comparando os dois tipos de pavimentos propostos, apenas a camada de sub-base da estrutura do pavimento tipo 1 apresentou uma diferença superior de 1cm de espessura utilizando bica corrida reciclada. De acordo com os custos levantados nesta pesquisa e apresentados na tabela 4.11, mesmo com a diferença de 1cm na espessura da camada de sub-base, o custo da execução da pavimentação utilizando o reciclado como insumo é menor.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES

O principal objetivo do presente trabalho consistiu na análise da viabilidade técnica e econômica da utilização do agregado reciclado de RCC em camadas de base e sub-base de pavimentos urbanos em substituição ao agregado convencional. Portanto, as conclusões apresentadas neste capítulo são realizadas a partir dos resultados laboratoriais, das estruturas dimensionadas de pavimentos propostos utilizando agregados reciclados e convencionais, e da análise econômica do emprego do reciclado.

A análise da natureza dos materiais constituintes da fração retida na peneira 4,76 mm indicou os materiais predominantes no RCC os cinzas (cimentícios), com 48%, em seguida os materiais finos passantes na peneira de 4,76 mm, considerados como solos, com 30%, e materiais vermelhos com 20% (telhas, tijolos, pisos e azulejos). Na separação dos constituintes do RCC foi identificada a presença de 2% em massa de materiais indesejáveis, atendendo ao requisito da NBR 15115 (ABNT, 2004) de materiais indesejáveis de no máximo 3% em massa. Os ensaios realizados na pesquisa mostraram que a composição do agregado reciclado misto influencia diretamente nas suas propriedades físicas e mecânicas, portanto é muito importante essa análise.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de índice de forma com os agregados reciclados analisados existe uma predominância de grãos com a forma cúbica. Existe uma relação da forma do grão com a origem do material. As porcentagens encontradas nas amostras de grãos lamelares atendem as recomendações das normas NBR 15115 (ABNT, 2004) de no máximo 30%

de grãos lamelares. A forma externa dos agregados é um fator importante para definir suas propriedades e comportamento sob a ação do tráfego, a forma ideal dos agregados é a cúbica, que conduz a um melhor entrosamento entre os grãos, produzindo maior travamento, com menor volume de vazios.

Foi possível observar a influência da cura na resistência mecânica dos materiais estudados nos ensaios de índice de suporte Califórnia: os valores médios encontrados nos ensaios de índices de suporte Califórnia das amostras de bica corrida reciclada foram de 25% e 70%, para as idades de 4 e 28 dias, respectivamente; e nos ensaios realizados com a BGS reciclada foram de 72%, 88%, e 88%, para as idades de 4, 28 e 90 dias, respectivamente. Comparando os crescimentos após cura de 28 dias dos materiais estudados, constatou-se que existe uma melhoria ao longo do tempo de cura do comportamento mecânico do agregado, possivelmente causadas pelo processo de hidratação de partículas pozolânicas presentes nos resíduos de origem cimentícios. Os resultados obtidos no ISC na bica corrida reciclada, atendem o mínimo exigido pela NBR 15115 (ABNT, 2004) para emprego em camada de reforço do subleito e sub-base de pavimentos urbanos, e a BGS reciclada, atendem o mínimo exigido para emprego em camada de base e sub-base de pavimentos urbanos.

Verificou-se nos resultados obtidos nos ensaios de granulometria uma mudança no diâmetro nominal dos grãos em relação à curva antes e após a compactação. No processo da compactação as partículas quebraram aumentando a fração de finos. Essa diferença na granulometria reforçou a importância da energia de compactação elevada, obtendo-se a maior quebra dos grãos possível durante a execução da compactação do material no campo, para minimizar o problema de degradação, evitando possíveis afundamentos ou rupturas indesejáveis. Os resultados obtidos nos ensaios de granulometria realizados com as amostras estudadas na presente pesquisa atendem aos requisitos das normas NBR 15115 (ABNT, 2004). Segundo DNER (1996) a graduação do agregado, representada pela curva de distribuição granulométrica, é uma das características que assegura a estabilidade aos pavimentos.

Nos ensaios de triaxiais de carga repetida, verifica-se que, independentemente do material e do período de cura, o modelo composto apresentou os maiores valores de coeficiente de determinação se comparado aos modelos potenciais de tensão confinante e tensão desvio. Nos

resultados obtidos, parece haver uma tendência de aumento de influência da tensão confinante com o aumento do tempo de cura, e apresenta uma tendência de aumento do módulo de resiliência com as tensões confinantes e desvio. Os resultados obtidos nos ensaios da BGS reciclada permitem observar uma tendência de aumento do módulo com o tempo. No caso da bica reciclada, parece haver uma tendência de inversão do comportamento, com a redução do módulo de resiliência com o aumento do tempo de cura.

Ao dimensionar os dois tipos de pavimentos propostos neste trabalho, tipo 1 e tipo 2, encontramos similaridades nas estruturas dimensionadas com agregados reciclados e convencionais. A diferença encontrada foi no pavimento proposto tipo 1, de 1 cm a mais de espessura na camada de sub-base dimensionada com agregado reciclado. O método utilizado no dimensionamento utiliza o ISC máximo de 20% para determinar a espessura do pavimento necessária para proteger a sub-base. A diferença encontrada entre as camadas de sub-base de reciclado e convencional foi resultado do coeficiente estrutural da bica corrida reciclada.

No que se refere à viabilidade técnica, o agregado reciclado estudado atendeu todos os requisitos das normas técnicas como insumo na construção das camadas de base e sub-base de pavimentos urbanos em substituição aos materiais convencionais. A normas NBR 15115 (ABNT, 2004), permite a utilização do material reciclado, que apresenta $ISC \leq 60\%$, em camadas de base para vias de tráfegos com $N \leq 10^6$ repetições do eixo-padrão de 80kN no período de projeto, vias classificadas pelo IP 02 - Prefeitura Municipal de São Paulo como leve, média e meio pesadas.

Analisando-se as composições dos custos para execução dos dois tipos de pavimentos propostos, constata-se que existe uma diferença para maior, entre 59% a 68%, do custo final de utilização do agregado convencional comparando com o reciclado. O valor encontrado em consulta bibliográfica da brita graduada convencional é aproximadamente 89% maior comparado ao custo do agregado reciclado.

Por fim, conclui-se que o agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil é de uso promissor como insumo na construção das camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego, em substituição aos materiais convencionais. Além disso, o emprego dos reciclados

apresentam vantagens econômicas para obras e prefeituras, e minimiza os impactos sócio-ambientais que os resíduos causam. Com a reciclagem e o consumo destes materiais reciclados, colaboramos com a garantia da preservação do meio ambiente e o compromisso de respeito pela natureza, bem como, a sociedade presente e futura.

Recomendações:

- ✓ Estudos realizados em outras cidades também verificaram o bom desempenho do agregado reciclado em camadas de pavimentos. Compreende-se a importância da realização de estudos específicos para materiais dos municípios, pois estes podem variar de acordo com cada região e, portanto, as experiências realizadas em outras localidades não podem ser generalizadas;
- ✓ A execução de um pavimento experimental e de ensaios de durabilidade é de significativa importância para avaliar o comportamento em longo prazo, do uso do agregado reciclado de RCC. É fundamental um trecho de pavimento piloto buscando monitorar propriedades relevantes e avaliar o desempenho do material em condições de uso ao longo do tempo;
- ✓ Estudar as deformações permanentes de agregados reciclados, verificando em campo se ocorre a quebra das partículas com aumento do número de repetições do carregamento e do nível de tensões;
- ✓ Desenvolver um catálogo de estruturas de pavimentos urbanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABDOU, M. R.; BERNUCCI, L.L.B. **Pavimento Ecológico: uma opção a pavimentação de vias das grandes cidades**. Sinal de Trânsito.

Disponível em: [http:// www.sinaldetransito.com.br/artigos/pavimento_ecologico.pdf](http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/pavimento_ecologico.pdf) .

Acesso em: Junho de 2007.

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2011.

Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2011.pdf> >.

Acesso em: julho 2013.

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2012.

Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf> >.

Acesso em: julho 2013.

ABRECON. **Entrevista com Gilberto Meirelles, Presidente da Abrecon**.

Disponível em: <http://www.abrecon.com.br/Noticias/71/Associados.aspx>.

Acesso em: Junho de 2013.

AFONSO, F. J. A. **Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos**. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFRJ / COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregado de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M. **Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade.** In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Artigo Técnico, 2002, Foz do Iguaçu, PR, 2002.

Disponível: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/>.

Acesso em: Junho de 2012

ARM, M. *Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial test and Field tests.* Waste Management and Research, v. 21, 2001.

ASSIS, L. M. R.; VILELA, M. T. L.; SOUZA, R. V.; REZENDE, L. R.; OLIVEIRA, J. C.; CARVALHO, J. C. **Análise comportamental de um pavimento com base e sub-base compostas com resíduos sólidos da indústria da construção civil (entulho).** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 36., Curitiba. Anais... Curitiba: RAPv, 2005.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR NM 5738, Moldagem e cura de corpos-de-prova e concreto, cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 1980.

_. NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil – Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004

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

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

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

_. NBR 11804: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente. Rio de Janeiro, 1991.

_. NBR 7181: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1986.

- _. NBR 7809: Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro em agregado graúdo. Rio de Janeiro, 2006.
- _. NBR 6954: Determinação da forma do material de lastro padrão. Rio de Janeiro, 1989.
- _. NBR 7182: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1989.
- _. NBR 6457: Amostra de solos – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

BENNERT, T; PAPP JR, W.J.; MAHER, A.; GUCUNSKI, N. *Utilizations of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications*. Transportation Research Record, Washington. 2000.

BERNUCCI, L. B et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2006.

BERNUCCI, L. B et al. Revista TÉCNICE: **Como construir pavimento ecológico**, v 126, p 78-80, Setembro, 2007.

BRASIL, SÃO PAULO. Decreto nº 48.075 de 28 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas do Município de São Paulo.

BRASIL, RIBEIRÃO PRETO SP. Decreto nº 332 de 09 de outubro de 2008. Disciplina o sistema para gestão sustentável de resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos do município e o plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção civil. Diário Oficial do Município na data de 17/04/07.

BRASIL, GUARULHOS SP. Lei nº 6.126 de 27 abril de 2006. Institui o plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção civil e volumosos e dá providências correlatas.

BRASIL, ARARAQUARA SP. Lei nº 6.352 de 09 dezembro de 2005. Institui o plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção civil e volumosos e dá providências correlatas.

BRASIL, AMERICANA SP. Lei nº 4.198 de 08 julho de 2005. Institui no município o sistema de Gestão sustentável de resíduos da construção civil e resíduos volumosos e o plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção civil de acordo com o previsto na Resolução nº 307 (5/07/2002) do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA, e dá outras providências, e em 2008 o decreto nº 7.730 (12/07/2008), dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas do município.

BRASIL, JOINVILLE. Lei nº 5.159 de 24 de dezembro de 2004 Institui o Sistema para gestão sustentável de resíduos da construção civil e resíduos volumosos no município de Joinville e dá outras providências.

BRASIL, SÃO JOSÉ DO RIO PRETO. Lei nº 9.393 de 20 de dezembro de 2004. Institui o Sistema para a Gestão Sustentável para os Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos, e o decreto nº 12.765 de 08 de abril de 2005, regulamenta a lei nº 9.393 de 20 de dezembro de 2004 que versa sobre o sistema de Gestão Sustentável de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos e o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil

BRITO FILHO, J.A. **Cidade versus entulho**. In: II seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil, São Paulo, 1999. Anais... São Paulo: IBRACON, 1999.

BLANKENAGEL, B.J.; GUTHRIE, W.S *Laboratory characterization of recycled concrete for use as pavement base material*. Transportation Research record, Washington, n. 1952, 2006.

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.

CASTRO, M. C. A.; SCHALH, V. ; FERNANDES, J. L. F.; LEITE, W. C. A. **Caracterização física e granulométrica dos entulhos gerados na construção civil na cidade de São Paulo**. In: Congresso ASSEMAE, São Paulo, 1997. Anais... 1997.

CATAPRETA, C. A.A.;PEREIRA, J.C.; ALMEIDA, A.H. **Avaliação do desempenho das usinas de reciclagem de resíduos de construção civil de Belo Horizonte**, Brasil. In: XXXI Congresso Interamericano AIDIS, Santiago, 2008. Anais... AIDIS 2008.

CHAVES, A. P; PERES, A.E.C. **Teoria e pratica do tratamento de minério - Britagem, peneiramento e moagem**. 2ª ed. São Paulo: Signus Editora, 1999. v.03.

CHINI, D.;WANG, J.; BILYEU, J. *Application of dynamic cone penetrometer in evaluation of base and subgrade layers*. Transportation Research Record, Washington, n. 1764, 2001.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Brasília . 2002. **Resolução CONAMA nº. 307**, de 05 de julho de 2002.

Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>.

Acesso em: Junho de 2012

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 2006.

.. DNER-ME 049: Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

.. DNER-ME 162: Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

.. DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1966). Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro. 1966.

.. DNER-ME 086 – Agregados – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

_ . DNER PRO 011: Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis: procedimentos B . Rio de Janeiro, 1979

_ . DNER PRO 269: Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV. Rio de Janeiro, 1994.

_ . DNER-ME 134: Pavimentação - Solos – Determinação do módulo de resiliência – metodo de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

EPA - *Enviromental Protection Agency - Municipal and Industrial Solid waste Division - Office of Solid Waste. United states*. 1998. Report n° EPA530-R-98-010 - Characterization of building - related construction and demolition debris in the United States.

Disponível em: <http://www.p2pays.org/ref/02/01095.pdf>. Acesso em: novembro de 2011.

Acesso em: Maio de 2012

EUROPEAN COMISSION - EC. *Management of construction and demolition waste*. 2000.

Disponível em: <http://ec.europa.eu/enterprise/environment> >

Acesso em: Maio de 2012

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em pavimentação dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte**. 2004. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro. 2004.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION U.S DEPARTMENTE OF TRANPORTATION. United Satates. 2004. *Transportation Applications of Recycled Concrete Aggregate*. FHWA States of the Practice Nacional Review September 2004.

Disponível em: <http://www.rmrc.unh.edu/resources/pandd/rcareport/rcareport.pdf> >.

Acesso em: Maio de 2012

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

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

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

JOHN, V. M. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção**. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSIA, J. C. S. (org). Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: projeto entulho bom. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001. Cap1, p.28-45.

KUO, S.; MAHGOUB, H.S;NAZEF, A. *Investigation of recycled concrete made with limestone aggregate for base course in flexible pavement*. Transportation Research Record, n. 1787, 2002.

LAURITZEN, E.K. *Economic and environmental benefits of recycling waste from the construction and demolition of buildings*. Industry and Environment, Paris, v.17, n.2, abr/jun. p. 26-31, 1994.

LEAL, U. **Sobras que valem uma obra**. Revista Téchnen°55, Outubro de 2001.

Disponível em: < <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/55/imprime32417.asp>>

Acesso em: Julho de 2012

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 185p

LEITE, F. C.; BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, R. S.; MOURA, E. **Influência da composição e da energia de compactação nas propriedades físicas e mecânicas de agregado reciclado**

de resíduo sólido da construção civil. In: XXI Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2007, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ANPET, 2007b.

LEITE, F. C.; BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, R. S.; MOURA, E.; ABDU, M. R. **Efeitos da compactação nas propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduos sólidos na construção civil.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 38., 2007, Manaus. Anais... Manaus: RAPv, 2007.

LEITE, F.C, MOTTA, R. S., BERNUCCI, L.L.B., MOURA, E., SILVA, P.F.A. **Comparação de valores de índice de suporte Califórnia de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.** In: 36ª Reunião anual de pavimentação, Curitiba, 2005.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduos de construção reciclado e de suas aplicações em argamassa e concretos.** Dissertação (mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios.** 3. ed. Rio de Janeiro: CETEM/ MCT, 2002.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico em 2008.** Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro, 2010. 219p.

MARQUES NETO, J. C. Livro: **Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição no Brasil.** São Carlos: RiMa, 2005. 162p.

MEIRELLES, G. Presidente ABRECON. Palestra no ÂNGGULO: **Resíduos da Construção Civil Soluções e Oportunidades: SindusCon SP**

Disponível em:

<http://www.anggulo.com.br/rcc/eventos%20anteriores/sp/palestras/Gilberto%20Meirelles.pdf>

Acesso em: Maio 2013

MOREIRA, J. F.; DIAS, J. F.; REZENDE, M. E. **Utilização de resíduos de construção e demolição em base de pavimentos na cidade de Uberlândia - MG.** Vias Gerais, Fevereiro 2007. p. 49-54, 2007.

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, 2006, Maceio. Anais... Rio de Janeiro: ABPv, 2006.

MOTTA, R. S. **Estudo Laboratorial de agregados reciclados de resíduos sólidos da Construção Civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MOTTA, L.M.G.; FERNANDES, C. **Utilização de resíduos da construção civil em pavimentação urbana.** In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12, Aracaju, 2003. Anais... Rio de Janeiro: ABPv, 2003.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos Flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** Tese (doutorado) - Coordenação dos programas de Pós-Graduação de engenharia, Universidade Federela do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ), Rio de Janeiro, 1991.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 2ª Edição, Rio de Janeiro, 2005.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos,** 1ª Ed. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. 1997.

MENDES, T.A.; REZENDE, L.R.; OLIVEIRA,, J.C; GUIMARÃES, R.C; CARVALHO, J.C.; VEIGAS, R. **Parâmetros de uma pista experimental executada com entulho reciclado.** In: Reunião Anual de Pavimentação, 35, Rio de Janeiro, 2004. Anais ABPv, 2004.

NETO, R.S.B.; PARREIRA, A. B.; MOTTA, L. M. G. **Estudo Comparativo de três métodos de projeto de pavimentos flexíveis utilizados no Brasil.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 36., Curitiba. Anais... Curitiba: RAPv, 2005.

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://ec.europa.eu/enterprise/environment>>.

NUNES, K.R.A. **Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição.** Tese (Doutorado) - Coordenação dos programas de Pós-Graduação de engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ), Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, J. C.; REZENDE, L. R.; GUIMARÃES, R. C.; CARVALHO, J. C. **Variação dos parâmetros de compactação e CBR de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 36., Curitiba. Anais... Curitiba: RAPv, 2005.

OLIVEIRA, J. C. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis.** Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

O' MAHONY, M.M; MILLIGAN, G.W.E. *Use of recycled materials in subbase layers.* Transportation Research record, Washington, n 1310, 1991.

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

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção: Estudo do uso em argamassa.** Dissertação (Mestrado) - Departamento de Arquitetura e Planejamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.

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

Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP). ETS- 001 – **Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. São Paulo, 2003.

POON, C.S; QIAO, X.C; CHAN, D. *Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base*. Construction and Building Materials, no 20, p.578-585, 2006.

RESPLANDES, H. M. S.; REZENDE, L. R. **Estudo do comportamento estrutural de pavimentos flexíveis construídos com agregado reciclado**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 38., 2007, Manaus. Anais... Manaus: RAPv, 2007.

RICCI, G. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 196p.

RAO, A.; JHA, K; MISRA, S. *Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete*. Resources, Conservation and Recycling, no 50, p. 71-81, 2007.

SCHULZ, R.; HENDRISCKS, F. *Recycling of masonry rubble. Recycling of Demolished Concrete and Masonry*. Report of Technical Committee - demolition and Reuse of Concrete, 37. London: RILEM, 1992.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO - SindusCon - SP. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil: A experiência do SindusCon- SP**. Tarcísio de Paula Pinto. São Paulo: SINDUSCON -SP, 2005. 48p.

SJOSTROM, E. *Service life of the building*. In: Application of the performance concept in building. CIB: Tel Aviv, 1996.

SOUZA, M.L. **Método de Projeto de pavimentos flexíveis**. IPR Publicado 667,3 ed. Revis e atual. Rio de Janeiro, 1981.

SYMONDS GROUP. *Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts*. 1999.

Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw_report.htm>

Acesso em: maio de 2012

VAZ, J. C. **Reciclagem de Entulho**. Publicado originalmente como DICAS nº 7 em 1994.

Disponível em: <<http://www.federativo.bndes.gov.br>>

Acesso em: Agosto de 2012

VON STEIN, E.L. Chapter 20: *Construction and demolition debris*. The McGraw Hill Recycling Handbook. Herbert F. Lund, 2nd edition, New York, 2000, 976p.

ZORDAN, S. E. **A Utilização do Entulho como Agregado na Confeção do Concreto**.

Dissertação (Mestrado) - Departamento de Saneamento e Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

YODER, E. J.; WITCZAK, M.W. *Principles of pavement design*. 2nd edition, New York, 1975.