

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL**

**CARACTERIZAÇÃO E ADEQUAÇÃO DOS  
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PRODUZIDOS  
NO MUNICÍPIO DE SANTA MARIA-RS PARA  
APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Lucas Delongui**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

# **CARACTERIZAÇÃO E ADEQUAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PRODUZIDOS NO MUNICÍPIO DE SANTA MARIA-RS PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

por

**Lucas Delongui**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental,  
Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental,  
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS),  
como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil e Ambiental**

**Orientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro**

**Coorientador: Prof. Dr. Deividi da Silva Pereira**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Delongui, Lucas

Caracterização e adequação dos resíduos da construção civil produzidos no município de Santa Maria-RS para aplicação em pavimentação / Lucas Delongui.-2012.

220 p.; 30cm

Orientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Coorientador: Deividi da Silva Pereira

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2012

1. Resíduos da construção civil 2. Gestão de resíduos 3. Ensaio laboratoriais 4. Aplicação em pavimentação 5. Comparativo econômico I. Pinheiro, Rinaldo José Barbosa II. Pereira, Deividi da Silva III. Título.

---

©2012

Todos os direitos autorais reservados a Lucas Delongui. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO E ADEQUAÇÃO DOS RESÍDUOS DA  
CONSTRUÇÃO CIVIL PRODUZIDOS NO MUNICÍPIO DE  
SANTA MARIA-RS PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

Elaborado por  
**Lucas Delongui**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil e Ambiental**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

**Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)**  
(Coorientador)

**Márcio Muniz de Farias, PhD. (UnB)**

**Washington Peres Núñez, Dr. (UFRGS)**

Santa Maria, 23 de Março de 2012.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos àqueles que de alguma forma auxiliaram na elaboração dessa dissertação. A vocês, o meu sincero obrigado pelo profissionalismo e pela amizade conquistada por meio da convivência durante esta caminhada.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio de sempre e pela força nas vezes que o cansaço estava presente, nunca deixando que eu baixasse a cabeça.

Ao Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro, por estar sempre presente, pelos ensinamentos dentro e fora de sala de aula, pelos conselhos profissionais, pela oportunidade de realizar a pesquisa, pelo incentivo, pela responsabilidade com que coordenou a realização desse trabalho e pelo exemplo de orientador que foi.

Ao Prof. Deividi da Silva Pereira, pela oportunidade que me foi dada de ingressar na pesquisa desde a graduação, pela orientação, pelos ensinamentos dentro e fora de sala de aula e, principalmente, pela motivação que sempre transmite aos seus alunos, para que não desanimem durante o caminho.

Ao Prof. Luciano Pivoto Specht, pelo apoio, pelos ensinamentos, pelas dicas que enriqueceram o trabalho, por estimular uma nova linha de raciocínio e, especialmente, pelos conselhos sobre o que está por vir.

À Prof<sup>a</sup>. Tatiana Cureau Cervo, pelos ensinamentos, pelas dicas que me foram de grande valia, as quais me ajudaram profissional e pessoalmente, e claro, pela motivação de sempre.

Aos demais professores que não foram citados, pelos ensinamentos e pelo apoio recebido.

Aos professores Márcio Muniz de Farias e Washington Peres Núñez, pelas considerações sobre esse trabalho e pelas dicas de futuras pesquisas.

Aos futuros colegas Tailene Thomas, Maurício Cordero, Júnior Machnach, Carolina Morcelli, Jocielle Borsa e Isabela Facco, pela ajuda nos ensaios laboratoriais e pela eficiência aliada ao bom humor.

Aos laboratoristas do LMCC da UFSM, pela ajuda na realização dos ensaios.

À secretaria do PPGECC da UFSM, pelo apoio e empenho em monitorar todos os procedimentos desde o ingresso até a defesa dessa dissertação.

À GR2 – Gestão de Resíduos, em especial ao Eng. Civil Gilson Tadeu do Amaral Piovezan Júnior e ao Eng. Civil Ricardo Pippi Reis, pelo apoio no trabalho, pela oportunidade de aliar a teoria com a prática e por ceder materiais para a realização da pesquisa.

À Luiza, pelo apoio para chegar até aqui, pelo seu entusiasmo, carinho e compreensão, e pelas tantas vezes que cedeu do seu tempo para me auxiliar nos trabalhos e projetos, sendo a minha revisora oficial.

A todos os colegas que me apoiaram e/ou ajudaram durante a vida acadêmica, agradeço pela contribuição de todos.

Aos meus amigos mais próximos, que souberam incentivar e compartilhar dos momentos da vida acadêmica, acompanhando e entendendo as mudanças que ocorreram nesse período.

À UFSM, pelos conhecimentos adquiridos através do ensino de qualidade.

A todos que me ajudaram e, correndo o risco de um indesculpável esquecimento, não foram citados, o meu agradecimento.

"Nós não podemos solucionar problemas com a mesma linha de pensamento usada para criá-los."

*Albert Einstein*

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Curso de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

### **CARACTERIZAÇÃO E ADEQUAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PRODUZIDOS NO MUNICÍPIO DE SANTA MARIA-RS PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

AUTOR: LUCAS DELONGUI

ORIENTADOR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO

COORIENTADOR: DEIVIDI DA SILVA PEREIRA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 23 de Março de 2012.

A indústria da construção civil é caracterizada por ser o setor que mais sofre influência com o crescimento da economia. Políticas governamentais de incentivo à habitação instigam o setor a produzir desenfreadamente, utilizando técnicas construtivas ultrapassadas e empregando mão de obra desqualificada, na tentativa de diminuir custos e encurtar prazos. O resultado desse ímpeto é a grande geração de resíduos que, quando não tratados, são jogados na natureza, ocasionando impactos ambientais irreparáveis. No entanto, os processos reciclagem e produção de agregados reciclados provenientes de resíduos da construção civil (RCC) estão se consolidando no Brasil, mas o mesmo não se pode dizer do emprego desses agregados. Por isso, essa pesquisa tem como objetivo caracterizar os agregados reciclados produzidos em Santa Maria para propiciar a sua utilização em pavimentação. Para isso, a pesquisa foi dividida em três etapas que contemplaram a situação atual dos RCC na cidade: tratamento e beneficiamento, caracterização dos agregados reciclados e possível aplicação. A primeira etapa constou da análise do sistema de gestão de resíduos empregado na cidade, a qual expõe uma avaliação do sistema de gerenciamento desde a implantação da área de tratamento de RCC, assim como relata exemplos e consequências do descarte irregular. A segunda etapa englobou a análise laboratorial, onde os agregados reciclados foram divididos conforme o tamanho comercial das britas da região e dosados adequadamente para que enquadrassem nos limites exibidos nas normas do DNIT para material granular. A partir disso, os agregados foram caracterizados e ensaiados para observar se atendem os critérios adotados pela NBR 15116, que especifica limites para utilização desse material em pavimentação. A terceira parte consistiu na análise da viabilidade econômica. Essa análise foi estimada dimensionando-se pavimentos compostos por brita graduada e outro por agregado reciclado que apresentassem mesmas respostas aos esforços, então comparou-se os custos para obtenção e execução das respectivas camadas executadas com esses materiais. Os resultados demonstraram os agregados reciclados atendem as especificações normativas até mesmo para altos volumes de tráfego. No geral, os agregados reciclados alcançam melhores resultados quando submetidos à energia de compactação intermediária, comportando-se semelhantemente as britas.

**Palavras-chave:** Resíduos da Construção Civil (RCC), Gestão de Resíduos, Caracterização Laboratorial, Aplicações, Pavimentação.



## **ABSTRACT**

Master's Dissertation  
Civil Engineering Course  
Civil and Environmental Engineering Graduation Program

### **CHARACTERIZATION AND ADEQUATION OF THE CONSTRUCTION WASTE PRODUCED IN SANTA MARIA-RS CITY FOR USE IN PAVEMENT**

**AUTHOR: DELONGUI, LUCAS.**

**ADVISOR: PINHEIRO, RINALDO JOSÉ BARBOSA.**

**CO-ADVISOR: PEREIRA, DEIVIDI DA SILVA.**

**Date and Location of Defense: Santa Maria, March 23, 2012.**

The civil construction industry is characterized for being the sector that suffers the most influence with the economy growth. Government policies to encourage housing instigate the sector to produce wildly, using outdated construction techniques and employing unskilled labor, in an attempt to reduce costs and shorten timeline. The result of this impetus is the great generation of waste which, when untreated, are thrown into nature, causing irreparable environmental impacts. However, the recycling and production processes of recycled aggregates from construction waste (C&D waste) are consolidated in Brazil, but the same cannot be said of the use of these aggregates. Therefore, this study aims to characterize the recycled aggregates produced in Santa Maria to promote their use in paving. For this, the research was divided into three stages which contemplated the current situation of the C&D waste in the city: treatment and processing, characterization of recycled aggregates and possible implementation. The first phase consisted of the analysis of the waste management system employed in the city, which exposes an assessment of the management system since the implementation of the C&D waste treatment area, as well as reports examples and consequences of irregular disposal. The second stage involved the laboratory analysis, where the aggregates were divided according to the commercial size of gravel in the region and dosed properly to fit standards within the limits shown in the DNIT for granular material. From this, the aggregates were characterized and tested to see if they meet the criteria adopted by the NBR 15116, which specifies limits for use of this material in pavement. The third part consisted of the analysis of economic viability. This analysis was estimated by scaling up floors consisting of crushed stone and the other by recycled aggregate that presented the same responses to these efforts, and then the costs for obtaining and execution of the respective layers executed with these materials were compared. The results demonstrated that the aggregates meet the regulatory specifications for even high traffic volumes. In general, recycled aggregates, achieve better results when subjected to intermediate compaction energy, behaving similarly to gravel.

**Keywords:** Construction and Demolition waste (C&D waste), Waste Management, Laboratory Characterization, Applications, Pavement.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Geração de RCC em alguns países da Europa .....	33
Tabela 02 – Quantidade de RCD coletado pelas empresas de limpeza pública em 2010. ....	34
Tabela 03 – Elevação da quantidade de RCD coletado pelas empresas de limpeza pública entre os anos de 2007 e 2010. ....	34
Tabela 04 – Participação dos RCC em relação aos RSU nas principais cidades de São Paulo.....	34
Tabela 05 – Comparação entre os tipos de RCC e a quantidade gerada na fase de construção.....	35
Tabela 06 – Eficiência da execução de um plano de gestão de resíduos em uma obra .....	36
Tabela 07 – Composição dos RCC em alguns países da Europa.....	41
Tabela 08 – Comparação entre tipos de gestão.....	43
Tabela 09 – Aspectos positivos e críticos da implantação de sistemas de gestão de RCC em canteiros de obras. ....	45
Tabela 10 – Municípios, total e com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição, por forma de disposição no solo, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação – 2008. ....	47
Tabela 11 – Exemplos de redução do custo, considerando diferentes reduções do empolamento.....	49
Tabela 12 – Redução total de custo associada à redução da massa de resíduos gerada por m <sup>2</sup> de construção. ....	49
Tabela 13 – Soluções de destinação para os resíduos.....	50
Tabela 14 – Possíveis formas de disposição dos RCC.....	51
Tabela 15 – Taxas de reciclagem de RCC na Europa. ....	55
Tabela 16 – Municípios, total e com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição, por existência e tipo de processamento dos resíduos, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação – 2008.....	61
Tabela 17 – Usinas de reciclagem do país em novembro de 2008.....	62
Tabela 18 – Classificação dos RCC segundo as Resoluções 307, 348 e 431 do CONAMA.....	70
Tabela 19 – Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação.....	71
Tabela 20 – Requisitos específicos para agregados reciclados destinados à pavimentação.....	71

Tabela 21 – Valores de peso específico seco máximo e umidade de compactação encontrados para agregados reciclados. ....	87
Tabela 22 – Valores de Índice de Suporte Califórnia encontrados para agregados reciclados .....	88
Tabela 23 – Comparação dos resultados das misturas contendo agregado reciclado .....	96
Tabela 24 – Composição das misturas. ....	99
Tabela 25 – Resultados do módulo de resiliência e da resistência à tração. ....	99
Tabela 26 – Resultados do ensaio de compactação e CBR das amostras .....	101
Tabela 27 - Especificações para material granular conforme volume de tráfego. ...	113
Tabela 28 – Custos referentes à brita produzida em central de britagem de 80m <sup>3</sup> /h.....	124
Tabela 29 – Custos referentes à usinagem de brita graduada.....	125
Tabela 30 – Custos referentes à execução de bases de brita graduada. ....	126
Tabela 31 – Parâmetros das curvas granulométricas .....	154
Tabela 32 – Resultados dos ensaios de abrasão “Los Angeles”.....	157
Tabela 33 – Resultados do ensaio de durabilidade.....	158
Tabela 34 – Absorção e massa específica das composições. ....	161
Tabela 35 – Dosagem das composições granulométricas conforme faixa especificada. ....	162
Tabela 36 – Resultados do ensaio de compactação.....	168
Tabela 37 – Variação entre máximos e mínimos resultantes do ensaio de compactação conforme faixa granulométrica e energia aplicada.....	169
Tabela 38 – Resultados do índice de forma.....	172
Tabela 39 – Resultados do índice de lamelaridade.....	173
Tabela 40 – Resultados do Índice de Suporte Califórnia. ....	174
Tabela 41 – Resultados do Índice de Suporte Califórnia para amostras rompidas sem saturação.....	178
Tabela 42 – Resultados do ensaio de permeabilidade com carga variável.....	181
Tabela 43 – Resultados do ensaio de resistência à compressão simples. ....	182
Tabela 44 – resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	184
Tabela 45 – Critérios de projeto para o trecho construído. ....	185
Tabela 46 – Módulo de Resiliência ( $M_R$ ) e Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) utilizados na avaliação dos esforços referente à estrutura composta por BGS. ....	187

Tabela 47 – Resultados da análise mecanicista referente às estruturas de pavimento compostas por BGS e agregado reciclado. ....	189
Tabela 48 – Custos referentes ao agregado reciclado produzido em central de britagem de 80m <sup>3</sup> /h. ....	192
Tabela 49 – Custos referentes à usinagem de agregado reciclado. ....	193
Tabela 50 – Custos referentes à execução de bases de agregado reciclado. ....	194
Tabela 51 – Custo da execução da camada de base constituída por agregados reciclados conforme o Módulo de Resiliência adotado e sua respectiva espessura.....	196

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Resíduos da construção civil em Santa Maria. ....	28
Figura 02 – Caracterização qualitativa dos RCC gerados em Florianópolis-SC. ....	39
Figura 03 – Composição dos RCC em algumas cidades do Brasil. ....	40
Figura 04 – Porcentagem de materiais reciclados no Japão entre 1995 e 2000.....	55
Figura 05 – Desconstrução de uma edificação utilizando demolição seletiva. ....	56
Figura 06 – Usinas de reciclagem de RCD classe A inauguradas ao longo dos anos... ..	64
Figura 07 – Relação entre produção de agregados e RCD gerado no Brasil. ....	64
Figura 08 – Exemplo de planta de britagem fixa. ....	66
Figura 09 – Exemplo de planta de britagem semimóvel.....	67
Figura 10 – Exemplo de britador móvel.....	67
Figura 11 – Flagrante de disposição de resíduos não inertes em caçamba coletora de RCC.....	75
Figura 12 – Evolução do valor das cinzas volantes conforme o desenvolvimento de novas aplicações. ....	80
Figura 13 – Concreto produzido com agregado reciclado.....	89
Figura 14 – Artefatos produzidos com agregado reciclado. ....	90
Figura 15 – Solo reforçado com agregados reciclados. ....	91
Figura 16 – Utilização de agregados reciclados em pavimentação.....	93
Figura 17 – Processo de seleção de estruturas de pavimentos.....	104
Figura 18 – Interface gráfica do programa “MnLayer” .....	106
Figura 19 – Agregados submetidos à análise granulométrica.....	109
Figura 20 – Caracterização quali-quantitativa através da separação por catação. .	110
Figura 21 – Máquina para realização do ensaio de abrasão “Los Angeles”.....	111
Figura 22 – Ensaio de durabilidade por ataque de sais .....	112
Figura 23 – Britador de mandíbulas utilizado em laboratório. ....	112
Figura 24 – Materiais e equipamentos para realização da massa específica de agregados graúdos e agregados miúdos. ....	114
Figura 25 – Ensaio de compactação .....	115
Figura 26 – Determinação do índice de forma e lamelaridade.....	116
Figura 27 – Execução do ensaio de ISC.....	117
Figura 28 – Ensaio de percolação com carga variável.....	118

Figura 29 – Execução do ensaio de resistência à compressão simples. ....	119
Figura 30 – Execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	120
Figura 31 – Localização de Santa Maria .....	127
Figura 32 – Orientação para gestão dos RCC realizados em obras. ....	131
Figura 33 – Fluxograma de aplicação do planejamento de gestão ambiental.....	132
Figura 34 – Localização da ATT e da usina de reciclagem de RCC de Santa Maria.....	133
Figura 35 – Ações de prevenção na ATT de Santa Maria.....	133
Figura 36 – Local de disposição clandestina (“bota-fora”).....	134
Figura 37 – Evolução da degradação ambiental causada pela disposição clandestina de RCC em local da periferia de Santa Maria. ....	135
Figura 38 – Controle volumétrico dos RCC na ATT .....	135
Figura 39 – Levantamento qualitativo dos resíduos que chegam à ATT em 2010..	136
Figura 40 – Porcentagem dos resíduos que chegam à ATT separados por classe.....	137
Figura 41 - RCC descartados em taludes. ....	139
Figura 43 - RCC descartados em área de preservação permanente. ....	139
Figura 42 - RCC descartados na drenagem urbana.....	139
Figura 44 - Caçambas de coleta sem proteção.....	139
Figura 45 - RCC descartados em zona habitacional. ....	140
Figura 47 - Sobras de uma obra em zona urbana.....	140
Figura 49 - Queima de RCC combustíveis. ....	140
Figura 51 – Caçamba carregada de lixo doméstico. ....	140
Figura 46 - RCC descartados em zona comercial.....	140
Figura 48 - Descarte de RCC em zona rural. ....	140
Figura 50 - Descarte em “bota-fora”.....	140
Figura 52 – Transporte inadequado de entulho.....	140
Figura 53 – Sobras do processo construtivo provenientes do pequeno gerador. ...	141
Figura 54 – Resíduo proveniente de reforma, descartado juntamente com o lixo doméstico.....	141
Figura 55 – Áreas de disposição final de RCC em Santa Maria: locais licenciados e clandestinos. ....	143
Figura 56 – Áreas de disposição final de RCC em Santa Maria: degradação ocasionada pelo descarte incorreto de RCC em alguns pontos da cidade. ....	144

Figura 57 – Vista panorâmica da área de transbordo e triagem de Santa Maria. ...	145
Figura 58 – Recebimento das cargas.....	146
Figura 60 – Carga rejeitada para tratamento.....	146
Figura 62 – Acondicionamento de resíduos de outras classes não passíveis de beneficiamento. ....	146
Figura 59 – Carga aceita para tratamento.....	146
Figura 61 – Triagem manual para separação do agregado Classe A. ....	146
Figura 63 – Beneficiamento do resíduo de Classe A. ....	146
Figura 64 – Retirada de contaminantes menores na esteira de alimentação.....	147
Figura 65 – Agregado reciclado disponível para comercialização.....	147
Figura 66 – Controle volumétrico dos agregados reciclados na ATT. ....	148
Figura 67 – Interligação entre os agentes envolvidos. ....	149
Figura 68 – Exemplo de Ponto de Entrega Voluntária (PEV) .....	150
Figura 69 – Rejeito doméstico disposto em caçambas coletoras de RCC. ....	151
Figura 70 – Rejeito industrial disposto em caçambas coletoras de RCC. ....	151
Figura 71 – Interface gráfica do usuário no <i>site</i> . ....	152
Figura 72 – Distribuição granulométrica das amostras de agregado reciclado. ....	154
Figura 73 – Composição média das três amostras coletadas. ....	156
Figura 74 – Ensaio de abrasão “Los Angeles” .....	157
Figura 75 – Agregados após o ensaio de durabilidade. Material retido e perdido no processo conforme o diâmetro das peneiras.....	158
Figura 76 – Distribuição granulométrica das composições. ....	160
Figura 77 – Composições granulométricas .....	160
Figura 78 – Enquadramento das composições granulométricas conforme as faixas delimitadas na norma rodoviária DNIT 141–ES (DNIT, 2010).....	163
Figura 79 – Curvas de compactação referentes às amostras da “Faixa A”.....	166
Figura 80 – Curvas de compactação referentes às amostras da “Faixa C”. ....	166
Figura 81 – Curvas de compactação referentes às amostras da “Faixa E”.....	166
Figura 82 – Curvas de compactação contemplando todas as faixas e energias.....	167
Figura 83 – Valores médios dos materiais comumente utilizados em pavimentação quando submetidos ao ensaio de compactação. ....	170
Figura 84 – Variação granulométrica após a compactação de amostras referentes à faixa A .....	171
Figura 85 – Variação granulométrica após a compactação de amostras referentes à faixa C .....	171

Figura 86 – Variação granulométrica após a compactação de amostras referentes à faixa E .....	171
Figura 87 – Comparação entre os resultados de ISC. ....	175
Figura 88 – Variação do ISC com o aumento da umidade.....	179
Figura 89 – Execução do ensaio RCS .....	182
Figura 90 – Execução do ensaio de RTCD .....	184
Figura 91 – Pavimento dimensionado com BGS.....	186
Figura 92 – Comparação entre as distribuições granulométricas enquadradas na faixa C nessa pesquisa com a curva granulométrica obtida por Leite (2007) para a faixa B. ....	188
Figura 93 – Estruturas de pavimento constituídas por materiais distintos e comportamentos semelhantes: comparação entre as espessuras da camada de base conforme decresce o Módulo de Resiliência. ....	190



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

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

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AM – Designação para procedência dos agregados reciclados utilizados nas amostras conforme a realização da coleta

ARC – Agregado de Resíduo de Concreto

ARM – Agregado de Resíduo Misto

ATT – Área de Transbordo e Triagem

BDI – Benefícios e Despesas Indiretas (*Budget Difference Income*)

BGS – Brita Graduada Simples

CA – Concreto Asfáltico

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR – *California Bearing Ratio*

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CN<sup>o</sup>4R – Composição N<sup>o</sup>4 Rebritado

CTR – Controle de Transporte de Resíduo

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (Atual DNIT)

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EI – Energia Intermediária

EM – Especificação de Material

EN – Energia Normal

EPI – Equipamento de Proteção Individual

ES – Especificação de Serviço

FA – Faixa “A”

FB – Faixa “B”

FC – Faixa “C”

FD – Faixa “D”

FE – Faixa “E”

FF – Faixa “F”

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada  
ISC – Índice de Suporte Califórnia  
ME – Método de Ensaio  
MEF – Método dos Elementos Finitos  
NBR – Norma Brasileira  
PBQP-H – Programa Brasileiro da Produtividade e Qualidade do Habitat  
PEV – Pontos de Entrega Voluntária  
PIGRCC – Programa Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil  
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos  
RCC – Resíduos da Construção Civil  
RCS – Resistência à Compressão Simples  
RCD – Resíduos de Construção e Demolição  
RS – Rio Grande do Sul  
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos  
RTCD – Resistência à Tração por Compressão Diametral  
SICRO – Sistema de Custos Rodoviários  
SINDUSCON – Sindicato da Indústria da Construção Civil  
UFSM – Universidade Federal de Santa Maria  
 $D_{máx}$  – Deflexão máxima  
 $\epsilon_t$  – Deformação específica  
 $\sigma_v$  – Tensão máxima de tração  
 $\nu$  – Coeficiente de Poisson  
 $M_R$  – Módulo de Resiliência  
 $\rho_d$  – Massa específica aparente seca

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>22</b>
1.1	Objetivos	24
1.1.1	Objetivo geral	24
1.1.2	Objetivos específicos	24
1.2	Justificativa	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>28</b>
2.1	Características básicas dos resíduos da construção civil	28
2.2	Geração de resíduos	30
2.3	Quantificação dos resíduos	32
2.4	Composição e variabilidade	36
2.5	Gerenciamento dos resíduos	40
2.6	Reciclagem	51
2.6.1	Demolição seletiva	56
2.7	Usinas de beneficiamento	57
2.7.1	Tipos de usinas de beneficiamento	65
2.7.1.1	Plantas fixas	65
2.7.1.2	Plantas semimóveis	66
2.7.1.3	Plantas móveis	66
2.8	Classificação normativa dos resíduos	68
2.9	Impactos ambientais causados pelos resíduos	73
2.10	Aspectos econômicos dos resíduos	77
2.11	Propriedades dos resíduos	81
2.12	Aplicações dos resíduos	88
2.12.1	Generalidades	88
2.12.2	Aplicações em pavimentação	95
2.13	Dimensionamento de pavimentos flexíveis	101
2.13.1	Análise Mecanicista	103
2.13.2	Determinação dos esforços atuantes por meio de ferramentas computacionais	105
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>107</b>
3.1	Estudo de escritório	107

<b>3.2</b>	<b>Análise dos sistemas de gerenciamento, gestão e reciclagem .....</b>	<b>107</b>
<b>3.3</b>	<b>Obtenção do material.....</b>	<b>108</b>
<b>3.4</b>	<b>Procedimento experimental .....</b>	<b>109</b>
3.4.1	Análise granulométrica .....	109
3.4.2	Caracterização quali-quantitativa das partículas .....	110
3.4.3	Resistência ao desgaste por abrasão .....	110
3.4.4	Durabilidade frente às intempéries.....	111
3.4.5	Composições granulométricas .....	112
3.4.6	Absorção e Massa específica.....	113
3.4.7	Compactação .....	114
3.4.8	Índice de forma e Lamelaridade .....	115
3.4.9	Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	117
3.4.10	Permeabilidade .....	118
3.4.11	Resistência à compressão simples .....	118
3.4.12	Resistência à tração por compressão diametral.....	119
<b>3.5</b>	<b>Análise da viabilidade econômica .....</b>	<b>121</b>
3.5.1	Dimensionamento de uma estrutura de pavimento .....	121
3.5.2	Análise mecanicista.....	122
3.5.3	Estimativa de custos .....	122
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>127</b>
<b>4.1</b>	<b>Gestão dos resíduos da construção civil em Santa Maria .....</b>	<b>127</b>
4.1.1	Generalidades .....	127
4.1.2	Legislação vigente.....	128
4.1.3	Gerenciamento no município.....	130
4.1.4	Implantação da Área de Transbordo e Triagem .....	132
<b>4.2</b>	<b>Avaliação do modelo de gestão de RCC existente em Santa Maria ....</b>	<b>133</b>
4.2.1	Situação anterior à implantação da ATT .....	133
4.2.2	Situação posterior à implantação da ATT .....	135
4.2.3	Implantação da usina de reciclagem de RCC de Santa Maria .....	142
4.2.4	Situação atual.....	148
4.2.5	Propostas para melhoramento do sistema de gerenciamento de RCC	151
<b>4.3</b>	<b>Caracterização do agregado beneficiado .....</b>	<b>153</b>
4.3.1	Análise granulométrica .....	153

4.3.2	Composição dos agregados reciclados.....	155
4.3.3	Abrasividade.....	155
4.3.4	Durabilidade .....	157
<b>4.4</b>	<b>Adequação dos agregados reciclados para uso em pavimentação ....</b>	<b>159</b>
4.4.1	Composições granulométricas .....	159
4.4.1.1	Massa específica .....	161
4.4.2	Enquadramento das composições nas faixas normativas.....	162
4.4.3	Compactação .....	164
4.4.4	Variação granulométrica .....	169
4.4.5	Índice de forma.....	172
4.4.6	Lamelaridade.....	172
4.4.7	Índice de Suporte Califórnia .....	173
4.4.8	Permeabilidade .....	180
4.4.9	Resistência à compressão simples .....	182
4.4.10	Resistência à tração por compressão diametral.....	183
4.4.11	Viabilidade econômica .....	184
4.4.11.1	Dimensionamento de uma estrutura de pavimento .....	184
4.4.11.2	Análise Mecanicista.....	186
4.4.11.3	Estimativa de custos.....	191
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES e CONSIDERAÇÕES .....</b>	<b>198</b>
5.1	Sugestões para futuras pesquisas .....	201
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>202</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nenhum país consegue crescer com dignidade sem que seus cidadãos tenham acesso à habitação, estradas seguras, saneamento básico, dentre tantos outros itens que sustentam a infraestrutura necessária para uma economia ascender. Políticas governamentais de crescimento e incentivo a habitação propiciam o desenvolvimento do setor da construção civil que, ao visar maior lucratividade, acaba empregando mão de obra desqualificada na tentativa de diminuir custos e encurtar prazos.

Tal fato, aliado ao desconhecimento da correta utilização de alguns materiais e a técnicas construtivas ultrapassadas, estimulam o consumo descomedido de matéria-prima. Isso traz como consequência o aumento na geração de resíduos sólidos decorrentes de sobras no processo construtivo que, em sua maioria, são dispostos em locais irregulares, geralmente caracterizados como zonas de risco ambiental.

Desde os primórdios da sociedade, o domínio e a transformação da natureza estão diretamente associados ao progresso e desenvolvimento. Logo, os recursos naturais eram utilizados de forma descontrolada, sem preocupações em relação a uma possível escassez das fontes naturais, o conceito de sustentabilidade era considerado contrário ao desenvolvimento. No entanto, esse cenário rapidamente trouxe malefícios, o que culminou com a adoção de critérios e diretrizes para limitar a extração e o uso de matérias primas (SCOTT HOOD, 2006).

Ao longo dos últimos anos, é crescente o número de pesquisadores que se dedicam a estudar métodos de reciclagem para diferentes tipos de resíduos. O mesmo acontece com os Resíduos da Construção Civil (RCC), popularmente chamados de “entulhos de obra”. Embora a reciclagem dos RCC não seja algo novo, o processo vem sendo retomado amplamente nas últimas décadas, com o crescente aumento no custo dos materiais e com a elaboração de leis específicas acerca dos RCC e, principalmente, de proteção ao meio ambiente.

Com o surgimento de leis acerca dos RCC, o setor da construção civil busca constantemente ações que conciliem produtividade com desenvolvimento sustentável. Entretanto, para que isso aconteça, são necessárias mudanças culturais, principalmente com referência à capacitação dos agentes envolvidos no

processo construtivo (empreendedores, fornecedores, responsáveis técnicos, funcionários e órgãos públicos). Além disso, são necessários investimentos em diversas áreas que possibilitem o avanço das tecnologias construtivas e permitam uma produção mais limpa, sem a geração exagerada de RCC que, segundo Pinto (1999), em alguns casos chega a ser de 20% do montante da obra.

Os métodos tradicionais de construção encontram-se obsoletos, visto que não se atingem resultados que atenuem a geração de RCC e permitam sua reutilização na totalidade. Assim, para que se tenha uma produção sustentável, a construção civil pode optar por dois destinos: criar e aprimorar tecnologias construtivas que propiciem a diminuição da geração de resíduos ou desenvolver técnicas para reutilização dos mesmos. Por isso, é necessário investir em pesquisas que visam minimizar o impacto negativo dos RCC através da sua reciclagem e reutilização.

Conforme Carneiro et al. (2001), uma maneira para propiciar a reutilização dos resíduos é a adoção da coleta seletiva na própria obra que, após ser executada, reuniria materiais com características semelhantes. Uma vez que o empecilho para reutilização dos RCC é a inconstância na sua composição, que varia de acordo com o tipo e etapa da obra, visto que a cadeia produtiva da construção civil gera resíduos e impactos ambientais em todas as etapas: extração de matéria prima, produção de materiais, construção, reformas e demolição.

Segundo John & Agopyan (2001), se os processos de reciclagem e produção de agregados reciclados de RCC estão se consolidando no Brasil, o mesmo não acontece com o emprego desses agregados. As tecnologias de emprego dos agregados reciclados na produção de componentes para uso na construção civil estão em desenvolvimento ao passo que esse material é caracterizado, o que constitui um processo lento. Isso explica em partes o receio dos técnicos para utilização desses elementos, pois no Brasil há a preocupação de se criar a cultura do uso seguro de novos materiais para então aplicá-los em larga escala. Caso isso aconteça com os RCC, posteriormente deve-se buscar o fornecimento de agregados reciclados com desempenho satisfatório e preço viável para possibilitar a sua utilização.

Nesse contexto, esse trabalho tem como finalidade caracterizar e adequar os agregados reciclados provenientes de RCC para que possam ser utilizados em pavimentação. Para isso, a pesquisa identificada e descreve os processos que abrangem os resíduos na cidade de Santa Maria desde a geração até o tratamento

final. Posteriormente, é abordada a pesquisa experimental que objetiva analisar o comportamento do agregado reciclado produzido no município quando submetido a ensaios prescritos nas normas rodoviárias. O trabalho ansiou buscar métodos e composições que viabilizem o uso dos RCC em substituição aos agregados comumente utilizados em pavimentação.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo geral

A pesquisa aqui relatada objetivou caracterizar os agregados reciclados de resíduos da construção civil produzidos no município de Santa Maria para propiciar o seu emprego em pavimentação. Através de análises laboratoriais, a pesquisa também buscou avaliar o comportamento desses agregados quando submetidos a procedimentos de adequação já existentes para utilização de materiais granulares.

### 1.1.2 Objetivos específicos

A pesquisa propôs-se a atender aos seguintes objetivos específicos:

- 1) Descrever as formas corretas e incorretas de disposição dos RCC no município;
- 2) Identificar os recorrentes impactos ambientais causados pelos RCC no município;
- 3) Avaliar os modelos de gerenciamento e gestão dos RCC adotados no município;
- 4) Caracterizar quantitativamente os RCC produzidos no município;
- 5) Caracterizar qualitativamente os RCC produzidos no município;
- 6) Descrever as áreas de tratamento de RCC no município;
- 7) Descrever e avaliar os processos de beneficiamento de RCC existentes;
- 8) Pesquisar as características físicas, químicas e mecânicas dos resíduos provenientes do processo de beneficiamento;



- 9) Adequar o material para que se enquadre nas delimitações propostas pelo DNIT para materiais granulares;
- 10) Analisar a viabilidade técnica dos processos estudados para possibilitar o uso dos RCC reciclados em pavimentação;
- 11) Analisar a viabilidade econômica da utilização dos RCC reciclados em comparação ao agregado usualmente utilizado;
- 12) Contribuir para o aprimoramento de metodologias que visem à reutilização dos RCC.

## **1.2 Justificativa**

A grande quantidade de resíduos provenientes dos diferentes processos do cotidiano industrializado e urbanizado é um assunto que atualmente preocupa as empresas e, principalmente, a sociedade. Com o crescimento e o desenvolvimento das cidades, programas governamentais de incentivo a construção, e o grande investimento aplicado, a indústria da construção civil depara-se com uma questão importante: a potencial geração de resíduos sólidos pelas obras novas e demolições. O que acarreta transtorno e divergências de opiniões de diversos órgãos e entidades sobre a disposição correta desse material. Esses são alguns aspectos que caracterizam a construção civil como grande geradora de impactos ambientais devido ao grande consumo de matéria-prima, a modificação da paisagem e a elevada geração de resíduos. Contudo, os resíduos da construção civil apresentam potencialidades na substituição dos agregados usados em pavimentação; ocupando, por exemplo, o lugar das britas graduadas.

Atualmente, o desafio da engenharia civil é conciliar a atividade produtiva com ações que conduzam um desenvolvimento sustentável, consciente e menos agressivo ao meio ambiente. Por ser uma questão complexa, requer grandes mudanças culturais, comportamentais e ampla conscientização de todas as partes envolvidos no processo construtivo (projetistas, empreendedores, fornecedores, responsáveis técnicos, funcionários, órgãos públicos e, até mesmo, o cliente). Uma das formas de reduzir os problemas gerados pelo acúmulo de resíduos é a reciclagem dos resíduos gerados na construção civil.

Para isso, é necessário tornar comum e automatizado o ciclo de reaproveitamento desses materiais, o que proporciona a redução dos desperdícios e ao mesmo tempo pode gerar economia nas obras (PINTO, 2005). Embora existam experiências no emprego de agregados mistos (solo, concreto, pedras, argamassas, cerâmica vermelha e branca) na utilização em pavimentos, e esse procedimento esteja em uso no Brasil desde o final da década de 80, ainda não está disponível ao público documentação técnica abrangente e consistente (JOHN & AGOPYAN, 2001).

Pesquisas nacionais e internacionais estão crescentemente demonstrando que o agregado reciclado apresenta viabilidade técnica para ser empregado em pavimentação. No entanto, há uma desconfiança por parte dos construtores em relação ao desempenho do mesmo. Ora, apenas cerca 12% da malha viária brasileira é pavimentada, e sabe-se que um dos grandes empecilhos para que isso aconteça são os altos custos envolvidos, tanto com materiais, como com procedimentos para execução. Porém, se esses agregados fossem consolidados nessa aplicação, seria uma maneira de reinseri-los no ciclo produtivo e melhorar nossa infraestrutura viária. Além disso, poder-se-ia destinar adequadamente esses resíduos que, nas cidades brasileiras, apresenta índices de variação entre 230 e 760 Kg/hab/ano, dependendo do porte da mesma (ANTT, 2009; PINTO, 1999).

Portanto, ao considerarmos os custos, impactos ambientais e restrições legais e benefícios técnico-econômicos que o reaproveitamento de grandes quantidades desse resíduo pode alcançar, justificam-se pesquisas que venham propiciar um destino nobre aos resíduos da construção civil.

A estrutura desse trabalho é composta por cinco capítulos e ao final estão dispostas as referências bibliográficas.

O capítulo 1, que é esta introdução, apresenta o assunto estudado, sua relevância e a necessidade da elaboração de pesquisas na área, assim como explicita os objetivos que orientaram o desenvolvimento dessa pesquisa.

O capítulo 2 compreende a revisão de literatura, onde são abordadas definições dos RCC e dados relativos à quantificação, composição e variabilidade desse material. Além disso, como o trabalho relata aspectos sobre o gerenciamento dos RCC no município, são apresentados os modelos de gestão de resíduos e suas consequências. Os procedimentos de reciclagem utilizados para os RCC também integram esse capítulo, os quais serviram para avaliar os processos existentes na

cidade. Por outro lado, são apresentadas as principais consequências do descarte clandestino de resíduos e os aspectos econômicos desse material. Ademais, são demonstradas as classificações normativas, algumas propriedades discutidas na pesquisa e suas potenciais aplicações. Por fim, são analisados alguns métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis e metodologias utilizadas para análise dos esforços resultantes.

O capítulo 3 trata da metodologia utilizada para aquisição dos dados, como também dos procedimentos utilizados nas análises laboratoriais. A primeira parte desse capítulo relata os procedimentos que monitoraram a análise dos sistemas de gerenciamento e reciclagem de RCC, assim como descreve a obtenção do material analisado. A segunda parte descreve como foram escolhidas as amostras e os procedimentos de adequação a que foram submetidos. Da mesma forma, demonstra minuciosamente como foram realizados os ensaios laboratoriais e a análise da viabilidade econômica.

O capítulo 4 relata os resultados obtidos na pesquisa. Para melhor entendimento, o capítulo foi dividido em quatro seções. A primeira seção compreende o histórico dos RCC no município, relatando aspectos legais e as ações que constituem o gerenciamento dos resíduos. A segunda seção analisa o modelo de gestão, a qual avaliou os agentes envolvidos no processo de gerenciamento, relatando a situação atual e apresentando propostas para melhoramento do mesmo. A terceira seção descreve a caracterização do agregado reciclado, onde foram analisadas algumas de suas características físicas, químicas e mecânicas desse material. Já a quarta seção relata os resultados obtidos com o processo de adequação, além de analisar a viabilidade técnica desse procedimento. Além disso, visando estimular a reciclagem de RCC na cidade e assim utilizar os processos de adequação estudados nessa pesquisa, a seção também faz um comparativo econômico da utilização de agregados reciclados em pavimentação frente ao material comumente utilizado, ou seja, as britas graduadas.

Por fim, o capítulo 5 relata algumas considerações sobre a pesquisa e apresenta algumas sugestões para pesquisas futuras que envolvam os RCC.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas definições, classificações, aspectos normativos, passivos ambientais, resultados de pesquisas, exemplos de sucesso, entre outros aspectos relativos aos resíduos da construção civil em âmbito nacional e internacional. O conteúdo apresentado nesse capítulo serviu de suporte para realização da parte experimental da pesquisa, bem como para comparação dos resultados obtidos.

### 2.1 Características básicas dos resíduos da construção civil

Com o crescimento da urbanização, as preocupações com saneamento trouxeram a necessidade de ampliar o conceito desse termo para totalidade dos componentes que interferem na qualidade de vida da população. Historicamente, são priorizados os meios de abastecimento, o que não acontece na mesma proporção com os sistemas de coleta e destinação final de resíduos, de tal modo que somente na última década essa preocupação foi estendida aos resíduos da construção civil (PINTO, 1999) (Figura 01).



Figura 01 – Resíduos da construção civil em Santa Maria.  
Fonte: Acervo do Autor (2009).

Com o aumento de fontes poluentes, Pinto (1999) observa que há a necessidade de ampliar o conceito de saneamento básico para saneamento ambiental, de forma que este abrangesse de maneira integrada os principais

componentes (água, esgoto, resíduos sólidos, drenagem e controle de vetores) que influenciam no meio urbano. Neste panorama, menciona que, na década de 90, as questões de limpeza e gestão de resíduos sólidos foram deixadas ao encargo dos municípios, sem suporte técnico e ações políticas (PINTO, 1999). Entretanto, no que se refere aos RCC, a partir de 2002, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) começou a instituir diretrizes acerca dos resíduos sólidos urbanos e, dessa maneira, amenizar os impactos ambientais causados pelo manejo incorreto dos mesmos.

Agopyan (1998) cita que a indústria da construção civil é uma potencial consumidora de recursos naturais e, se não forem desenvolvidas novas tecnologias construtivas, é provável que não diminua significativamente a quantidade de materiais utilizados para não comprometer a qualidade e segurança das construções. Neste sentido, Degani (2003) expõe que o setor da construção civil afasta-se cada vez mais do que se denomina desenvolvimento sustentável, ou seja, progresso social e crescimento econômico aliados à preservação do meio ambiente, pois ainda é marcante a despreocupação desse setor com o grande volume gerado, manejo correto e a destinação final dos seus resíduos. De acordo com dados de Pinto (2005), o volume de RCC gerados representa cerca de dois terços da massa total de resíduos sólidos gerados nas cidades.

Segundo Angulo (2000), a definição de RCC (ou RCD – Resíduos de Construção e Demolição) ainda é motivo de discordância, não só em relação à abrangência das frações presentes, como também quanto às atividades geradoras dessas frações. Isso se evidencia no estudo de John (2000), que ressalta a diferença entre os tipos de resíduos e as fases que eles são produzidos, são elas: fase de construção (canteiro), fase de manutenção e reformas, e fase demolição. Por exemplo, o resíduo proveniente da fase de construção é decorrente de perdas no processo produtivo; já o produzido na fase de manutenção ou demolição, geralmente está degradado por ação do tempo ou de outra patologia. Assim, por mais durável que seja o material, em algum momento, inevitavelmente, esse material se transformará em resíduo.

A NBR 10004 (ABNT, 2004), que classifica os diversos tipos de resíduos sólidos segundo os riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública através de técnicas de manuseio e destinação final dos resíduos sólidos, considera os RCC como Resíduos Classe II B – Inertes – e são definidos como “*quaisquer resíduos*

*que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor”.*

Devido a esta classificação e a baixa agressividade que causam a maioria dos constituintes dos RCC, que não são putrescíveis, pouca importância foi dada para estes, pois a expressão inerte implica na ideia de pequeno impacto ambiental e que quase não há prejuízo à saúde pública (PINTO, 1999).

No entanto, Oliveira (2002) concluiu que os resíduos de concreto apresentam-se como “não inertes”, quando submetidos ao ataque de águas de chuva ácida, pois verificou-se que os íons provenientes da decomposição desses resíduos presentes nas águas de chuva ácida contribuem para a mineralização dos cursos d’água que alteram as condições das águas naturais.

Essa, entre outras propriedades, implicou a mudança na percepção dos pesquisadores acerca da potencial degradação que os RCC podem ocasionar. Dessa forma, há um consenso entre os autores que, para enfraquecer essa potencialidade, deve-se investir em pesquisas que caracterizem essas propriedades e possibilitem o reaproveitamento desse material.

## **2.2 Geração de resíduos**

Antigamente, a ausência de informações acerca da geração de RCC trouxe como único indicador “montanhas” de entulho nos ambientes urbanos. Somente no final da década de 90 deu-se início a quantificação das ocorrências de perdas e sobras na construção civil, que resultou a supremacia dos RCC na composição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em cidades de médio e grande porte (PINTO, 1999).

Pinto (2005) expõe que cerca de 75% dos RCC gerados provêm de eventos informais, ou seja, de obras realizadas pelos próprios usuários dos imóveis. Esse índice contribui significativamente para produção de RCC, pois a intensidade de perda no processo construtivo tradicional varia entre 15 e 30% da massa total de materiais, o que também depende da tecnologia construtiva utilizada pelo executor.

Corbioli (1996) cita que, na década de 90, quase 98% das obras utilizavam métodos construtivos tradicionais, que acarretavam índices notáveis de geração de resíduos. Hoje em dia, a tecnologia aplicada à construção apresenta benefícios, porém esses processos se tornam onerosos visto que não estão consolidados no Brasil. Isso faz com que a maioria dos construtores opte por utilizar técnicas tradicionais.

Com a adição da Resolução 307/2002 do CONAMA, que estabelece diretrizes para o manejo, transporte e disposição dos RCC, tem-se conhecimento de índices sobre a geração de RCC assim como encontra-se para os RSU. Contudo, Pinto (1999) explica que a obtenção desses dados pode ser realizada a partir de três bases de informação: estimativa de área construída; movimentação das cargas por coletores; e, monitoramento de descarga nas áreas de recebimento de RCC. Todavia as informações obtidas nessa última base de dados são dificultadas pela falta de agentes fiscalizadores, isso explica a grande quantidade de resíduos dispostos em locais irregulares, contaminando o ambiente urbano.

John (2000) cita que o setor da construção civil é o maior consumidor de matéria prima, pois consome de 15 a 50% de todos os recursos extraídos da natureza. Porém, grande parte desses recursos não é aproveitada na sua totalidade, logo são dissipados em decorrência das falhas nas três etapas do processo construtivo: fase de construção, fase de manutenção e fase de demolição.

A geração de RCC durante a fase de construção é decorrência de perdas nos processos construtivos. Já na fase de manutenção, a geração está associada a fatores como: defeitos (patologias), reformas ou componentes degradados, os quais necessitam substituição. Entretanto, a fase mais crítica é a demolição. Por isso, a geração de resíduos nessa fase está ligada com a vida útil da edificação e de seus componentes, além das técnicas empregadas para demolição ou desmontagem que permitam a reutilização dos seus componentes. Vale ressaltar que alguns componentes podem apresentar patologias e se apresentam como materiais contaminantes numa possível reutilização (JOHN, 2005).

Pinto (1999) considera que o entulho gerado na fase de construção corresponde a cerca de 50% do material desperdiçado, pois nem toda perda é transformada em resíduo, grande parte é utilizada na própria obra, como, por exemplo, material de aterro. Já nas obras de reformas, a não reutilização dos materiais é reflexo da falta de cultura de reciclagem, associado ao desconhecimento

das potencialidades do entulho como material de construção. Para que haja uma mudança cultural e, por conseguinte, uma mudança nos hábitos construtivos, é necessária capacitação técnica e desenvolvimento de pesquisas que demonstrem as potencialidades dos RCC.

Segundo levantamentos realizados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o setor da construção civil precisa combater a geração em massa de resíduos, pois os RCC são responsáveis por até 50% do total de resíduos sólidos gerados no Brasil. Os dados da ABRELPE mostraram que os municípios brasileiros coletaram cerca de 31 milhões de toneladas de RCC em 2010, superando o percentual de 2009 em 8,7% (ABRELPE, 2010).

### **2.3 Quantificação dos resíduos**

Apesar dos RCC serem um problema de magnitude crescente, há pouco consenso sobre o volume gerado. Há uma ausência de estatísticas confiáveis na maioria dos países, tal fato é motivado pela disposição incorreta desses resíduos. Solis-Guzman et al. (2009) relatam que em todo o mundo os RCC representam aproximadamente 35% do total de resíduos, na Europa os mesmos autores mencionam que os RCC representam 450 milhões de toneladas por ano.

A produção de RCC depende essencialmente do cenário econômico de um país. Dessa maneira, Kofoworola & Gheewala (2009) demonstram por meio da Tabela 01 a geração de RCC em alguns países da Europa, onde os resultados apontaram que a sólida economia alemã detém uma potencial indústria da construção civil, e assim produz cerca de três vezes mais RCC que os outros países.

No Brasil, as estimativas de geração de RCC variam em torno de 230-760 Kg/hab/ano, por outro lado as estimativas internacionais apresentam variação entre 130-3000 Kg/hab/ano (PINTO, 1999). Do mesmo modo, Pinto (1999) afirma que a geração de RCC nas cidades de médio e grande porte varia em torno de 510 Kg/hab/ano. Já Schneider (2003) exemplifica que para uma população urbana de aproximadamente 140 milhões de pessoas, pode-se gerar cerca de 70 milhões de toneladas por ano. A cidade de São Paulo apresenta uma geração per capita de 499 Kg/hab/ano, correspondendo a 16.000 t/dia.



Tabela 01 – Geração de RCC em alguns países da Europa

<b>País</b>	<b>Geração (Kg/hab/ano)</b>
Alemanha	2600
Áustria	300
Dinamarca	500
Holanda	900
Média da União Europeia	480

Fonte: Kofoworola & Gheewala (2009)

Angulo et al.(2003) citam que as pesquisas realizadas no Brasil para estimar a quantidade de RCC gerados estão em crescimento nos últimos anos. Os resultados das primeiras pesquisas, realizadas antes de 2003, apresentaram uma geração de 68,5 milhões de toneladas anualmente. No entanto, estima-se que esses valores oscilem de acordo com a instabilidade da economia (JÚNIOR, 2005).

Tais fatos são exemplificados na pesquisa de Xavier (2001), que constata que a capital do estado de Santa Catarina, Florianópolis, possui uma geração de 795,18 t/dia, menor que muitas cidades de médio porte no Brasil. Entretanto, se considerarmos que atualmente a população de Florianópolis possui cerca 420.000 habitantes, contra aproximadamente 11,3 milhões da cidade de São Paulo-SP (IBGE, 2010), o índice per capita é estimado em 872,35 Kg/hab/ano, valor acima dos parâmetros nacionais.

A tarefa de quantificar os RCC produzidos em uma região pode apresentar grandes dispersões. No Brasil, um dos fatores causadores dessas dispersões é a contaminação dos RCC com outros resíduos, geralmente RSU. Segundo levantamentos da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o índice de RCC coletados no Brasil pelas empresas de limpeza pública chega a quase 100.000 toneladas por dia.

A Tabela 02 expõe os indicadores de coleta de RCC pelas empresas de limpeza pública em 2010. Os resultados demonstram a soberania da região sudeste na produção de RCC, porém a região centro-oeste apresenta o maior índice de descarte irregular de RCC, os quais são misturados aos RSU. Já a Tabela 03 demonstra que as empresas de limpeza urbana coletaram em 2010 aproximadamente 8,7% a mais de RCC misturados aos RSU que em 2009, enquanto que a população urbana cresceu cerca de 1,4%. Isso evidencia que, mesmo com a adoção de leis que regulamentam o descarte diferenciado dos RCC,

grande parte da população desconhece ou ignora os princípios adotados pelos órgãos públicos.

Pinto (2005) demonstra por intermédio da Tabela 04 a participação dos RCC em relação aos RSU nas principais cidades do estado de São Paulo, os resultados revelaram que em alguns municípios o percentual pode chegar a 2/3 do total de resíduos gerados.

Tabela 02 – Quantidade de RCD coletado pelas empresas de limpeza pública em 2010.

Região	2010		
	População Urbana (hab)	RCD Coletado (t/dia)	Índice (Kg/hab/dia)
Norte	11.663.184	3.514	0,301
Nordeste	38.816.895	17.995	0,464
Centro-Oeste	12.479.872	11.525	0,923
Sudeste	74.661.877	51.582	0,691
Sul	23.257.880	14.738	0,634
BRASIL	160.879.708	99.354	0,618

Fonte: ABRELPE (2010).

Tabela 03 – Elevação da quantidade de RCD coletado pelas empresas de limpeza pública entre os anos de 2007 e 2010.

Ano	População Urbana (hab)	RCD Coletado (t/dia)	Índice (Kg/hab/dia)
2007	152.496.807	72.597	0,476
2008	157.037.300	80.342	0,512
2009	158.657.883	91.444	0,576
2010	160.879.708	99.354	0,618

Fonte: ABRELPE (2010).

Tabela 04 – Participação dos RCC em relação aos RSU nas principais cidades de São Paulo.

Município	Geração diária (t/dia)	Participação em relação aos resíduos sólidos urbanos
São Paulo	17.240	55%
Guarulhos	1.308	50%
Diadema	458	57%
Campinas	1.800	64%
Piracicaba	620	67%
São José dos Campos	733	67%
Ribeirão Preto	1.043	70%
Jundiaí	712	62%
São José do Rio Preto	687	58%
Santo André	1.013	54%

Fonte: Pinto (2005).

Em um estudo que envolveu mais de 100 construtoras em todo o país, Agopyan (2001) constatou que o desperdício de material incorporado nas obras é aproximadamente 8% de todo o material utilizado. Essa pesquisa contrariou os dados que vinham sendo apresentados na década de 90, os quais eram creditados que os números do desperdício na construção civil eram quase 1/3, ou seja, a cada três edificações construídas, uma era perdida.

Pascual & Cladera (2004) baseiam a estimativa de geração de resíduos em uma correlação linear entre a quantidade de gerada e o consumo de Cimento Portland. Mariano (2008) analisou a geração de RCC durante a fase de construção de uma escola com uma área de 4.465m<sup>2</sup> em Campo Largo-PR (Tabela 05). Então, comparou-se com os resultados de Monteiro et al. (2001), Bohne et al. (2005) e Tozzi (2006). Os resultados confirmam o propósito de Pascual & Cladera (2004), pois demonstram a geração de RCC durante a fase de construção é proporcional ao desperdício de materiais a base de cimento, ou seja, derivados de concreto e argamassa.

Tabela 05 – Comparação entre os tipos de RCC e a quantidade gerada na fase de construção

Material	Mariano (2008)	Monteiro et al. (2001)	Bohne et al. (2005)	Tozzi (2006)
	Quantidade de resíduos (Kg/m <sup>2</sup> )			
Concreto	9,08	87	19,11	3
Cerâmica	2,55	-	-	17,65
Argamassa	2,93	189	-	18,33
Madeira	16,82	3	2,75	0,87
Papel	0,16	21	0,46	0,58
Plástico	0,04	-	-	2,43
Fibrocimento	0,63	-	0	-
Outros	1,94	-	6,19	-
Perigosos	-	-	0,07	-
Gipsita	-	-	1,38	-
Vidro	-	-	0,12	-
EPS (Poliestireno Expandido)	-	-	0,21	-
Metais	-	-	0,48	-
Total	34,15	300	30,77	42,86

Fonte: Torgal & Jalali (2011).

Mariano (2008) expõe que a grande quantidade de perdas e, por conseguinte, geração de resíduos no processo construtivo é reflexo da ineficiência de um plano de gestão de resíduos. Uma das formas de se avaliar a eficiência é a comparação entre a quantidade de material adquirido e a quantidade de resíduos produzidos no fim da obra.

Os resultados apresentados na Tabela 06, respectivos à eficiência de um plano de gestão de resíduos adotado por Mariano (2008) em uma obra de médio porte no município de Campo Largo-PR, demonstraram que a taxa de perdas é inferior a 5%. Esse valor mostra a eficiência do planejamento em todas as fases da obra, pois os resultados são significativamente inferiores as taxas de desperdício nacionais e internacionais.

Tabela 06 – Eficiência da execução de um plano de gestão de resíduos em uma obra

<b>Material</b>	<b>Quantidade adquirida (t)</b>	<b>Quantidade desperdiçada (t)</b>	<b>Eficiência (%)</b>
Concreto	2175,38	40,54	98,14
Cerâmica	508,72	11,38	97,76
Argamassa	629,78	13,07	97,92
Fibrocimento	27,55	2,81	89,8
Madeira	88,34	75,1	14,98
<b>Total</b>	<b>3429,77</b>	<b>142,9</b>	<b>95,83</b>

Fonte: Mariano (2008).

## 2.4 Composição e variabilidade

Segundo Zordan (1997), os RCC são os mais heterogêneos dentre os resíduos industriais, pois são compostos de sobras de materiais e componentes utilizados pela indústria da construção civil, tais como brita, areia, materiais cerâmicos, concretos, argamassas, madeira, metais, papéis, plásticos, rochas, tintas, gesso, solventes, entre outros. A composição RCC está associada à natureza de seus constituintes, desse modo apresentam-se com características físicas e químicas variáveis, assim como dimensões e geometrias irregulares.

Uma das causas da grande variabilidade na composição dos resíduos é o fato do canteiro de obras ser um ambiente dinâmico que, na busca por um aumento na produtividade, se sujeita a modificações em função do cronograma de execução dos serviços. Como diversas atividades são desempenhadas concomitantemente, ocorre

a execução de diferentes tecnologias construtivas aliadas a utilização de materiais de diferentes naturezas, o que contribui para a heterogeneidade nos resíduos gerados nas obras (SANTOS, 2007).

Os RCC provêm de um setor que utiliza diversos métodos construtivos, por isso, a composição dos resíduos está diretamente ligada ao tipo e a fase que uma obra se encontra, e da mesma forma influi na qualidade dos agregados reciclados que serão produzidos. No entanto, esse problema pode ser amenizado se, já nas obras, os RCC forem separados conforme a composição, a fim de reduzir a variabilidade (JOHN, 1999).

Segundo Cassa et al. (2001), a grande variabilidade na composição dos RCC é decorrente de fatores como: diversidade dos produtos utilizados nas obras; diferentes tecnologias construtivas; tipos de materiais predominantes na região do empreendimento e/ou ainda, da qualidade e treinamento da mão de obra.

No que se refere à constituição dos RCC, Carneiro et al. (2000) relatam que cerca 90% dos mesmos são oriundos de frações de natureza mineral, tais como: concretos, argamassas, rochas naturais, solos e cerâmicas. Do mesmo modo que Cassa et al. (2001), Carneiro et al. (2000) salienta que a diversidade de matérias-primas que compõem os materiais empregados na construção civil influem diretamente nas características dessas frações. Portanto, o nível de desenvolvimento da construção local delimita as características dos materiais que constituem o entulho.

Além disso, os RCC são compostos por uma diversidade de materiais que também podem agregar substâncias tóxicas, tais como fenóis, sulfatos, óleos, resinas, metais pesados, etc. Para que não comprometam a qualidade dos materiais, esses contaminantes não podem passar de 1% da massa (ANGULO, 2000). Da mesma maneira, Hansen (1992) explica que materiais como plásticos, resíduos betuminosos, gesso, vidros, além de substâncias derivadas de cloretos e álcalis, são impurezas presentes nos RCC e, se incorporadas à produção de agregados reciclados, podem trazer consequências indesejáveis ao conjunto. Outro aspecto a ser ressaltado é a técnica utilizada na demolição, que pode contribuir (ou não) para reutilização dos RCC. Pois as demolições convencionais misturam fases de resíduos, acarretando a contaminação dos mesmos com resíduos perigosos ou não recicláveis (JOHN & ANGULO, 2003).

Geralmente, os métodos utilizados para caracterizar os RCC são baseados em processos de triagem seguidos por catação para separação dos componentes. Na maioria das vezes esse processo é dificultado devido ao tamanho das partículas, por isso vários pesquisadores utilizam uma espécie de “catação visual” das partículas. Esses métodos, apesar de serem simples e praticamente sem custos, apresentam empecilhos como: dificuldade de reprodução da técnica, complexidade para diferenciação entre partículas de argamassa e de concreto, variabilidade de propriedades físicas de determinadas espécies minerais, e também a impossibilidade de caracterizar agregados miúdos (ANGULO et al., 2004).

Santos (2007) explica que grande parte das usinas de reciclagem separa os RCC conforme sua composição em três tipos principais: cinza (os quais predominam materiais cimentícios), vermelho (com predominância de materiais cerâmicos vermelhos) e misto (composto de materiais com diversas frações impregnadas, como rochas, materiais betuminosos, entre outros).

Bossink & Brouwers (1996) relatam que nos canteiros de obra da Holanda, aproximadamente 88% dos resíduos produzidos são compostos de uma pequena variedade de materiais (derivados de cerâmica e argamassas). Além disso, 75% dos custos de gerenciamento de RCC são originados nas etapas construtivas, que compreendem as fundações, execução da estrutura, vedação e revestimento.

Por meio de uma caracterização qualitativa dos RCC produzidos em Florianópolis-SC (Figura 02), Xavier (2001) destaca a possibilidade de reaproveitamento dos resíduos em virtude da sua composição ser predominante de derivados de cerâmica e cimento. Os dados retratam que uma parcela de 64,21% da massa gerada na cidade é passível de trituração e graduação para obtenção de materiais granulares, tais como: brita pedrisco, areia grossa e fina.

Conforme alguns autores retrataram acima, as características regionais tais como disponibilidade de matéria prima, fatores sociais e ambientais, condições topográficas, panorama político e nível de desenvolvimento econômico, delimitam a grande variabilidade na composição dos RCC. Nesse enfoque, a Figuras 03, adaptada respectivamente de Pinto (1986), Brito Filho (1999 apud JOHN, 2000), Souza et al. (2004), e Carneiro et al. (2000), apresenta a composição dos resíduos em quatro cidades do Brasil. Os dados mostraram que as capitais tiveram consumo maior de derivados de concreto, reflexo da maior quantidade de obras novas. Já Itatinga-SP, caracterizada por ser uma cidade interiorana com poucos habitantes,

obteve porcentagens mais baixas quanto ao uso de concreto, pois os índices se mantiveram idênticos aos de material cerâmico e solo, o que leva a crer que a maioria do entulho gerado é reflexo de obras de demolições e reformas. No entanto, outro aspecto que pode ser notado no gráfico é a diferença na produção de resíduos conforme a tecnologia empregada, as cidades de Salvador-BA e Recife-PE obtiveram as maiores porcentagens de entulhos de outros tipos, como madeira, matéria orgânica, etc., reflexo da utilização do método construtivo tradicional. No caso de São Paulo-SP, com o emprego de novas tecnologias construtivas, a geração desses resíduos é muito pequena, demonstrando uma produção mais limpa.

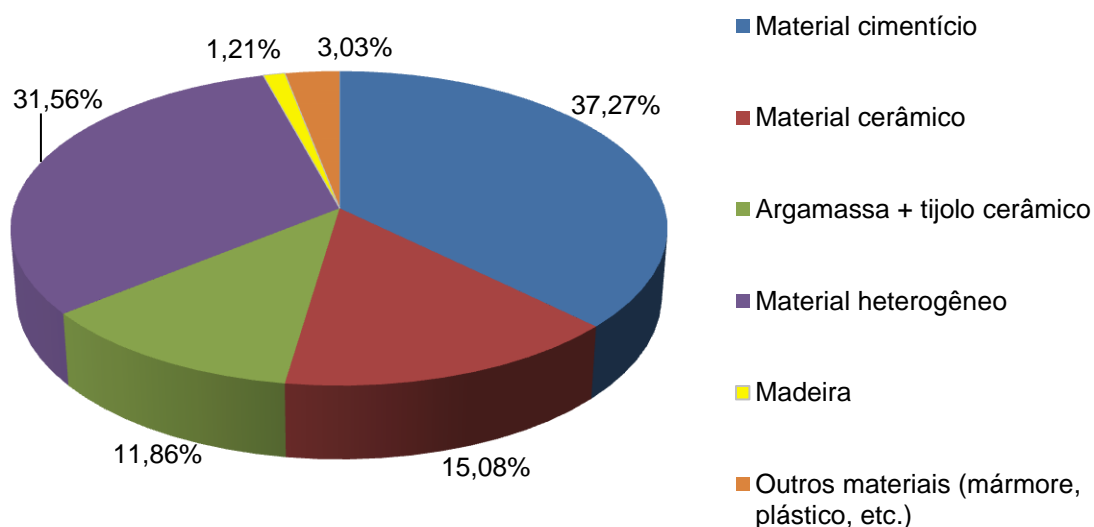


Figura 02 – Caracterização qualitativa dos RCC gerados em Florianópolis-SC.  
Fonte: Adaptado de Xavier (2001).

A estimativa precisa da quantidade e composição dos RCC é imprescindível para garantir a mínima e contínua entrada de resíduos nas instalações de reciclagem. No entanto, é muito difícil estimar a geração de RCC, uma vez que as construtoras não são obrigadas a registrar quali-quantitativamente as suas perdas e sobras (CORONADO et al., 2011).

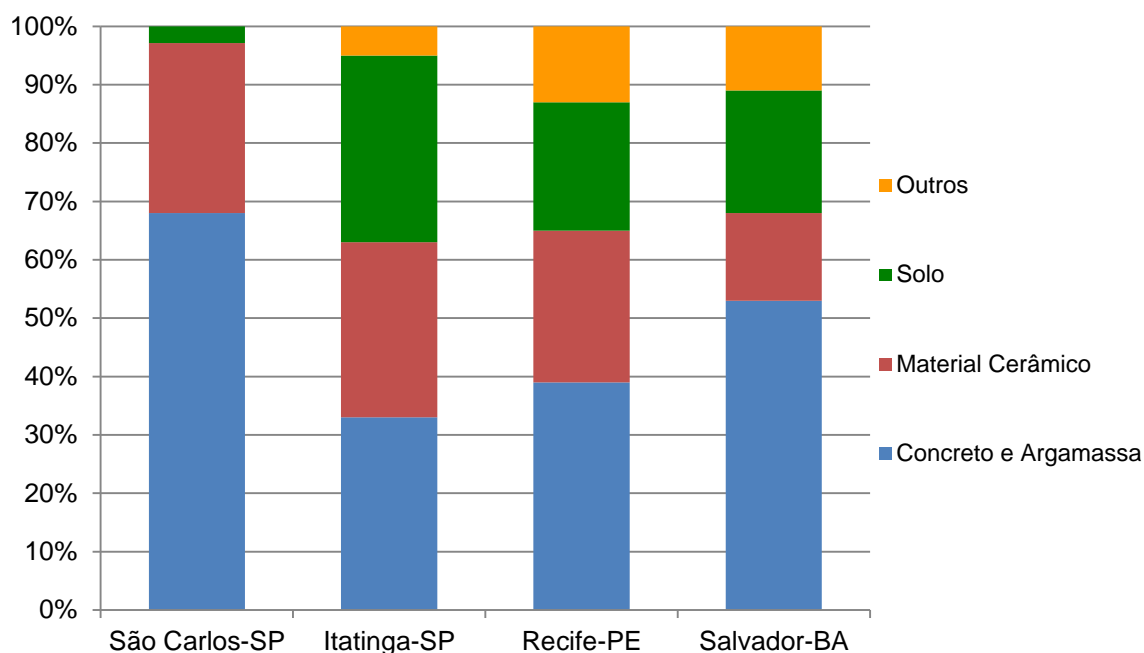


Figura 03 – Composição dos RCC em algumas cidades do Brasil.

Conforme a Tabela 07, Coronado et al. (2011) apresentam as diferenças na composição dos RCC produzidos em alguns países da Europa. Por meio dos resultados obtidos é possível fazer uma comparação com o Brasil. Conforme demonstrado nas Figuras 02 e 03, a maioria dos resíduos gerados no Brasil era proveniente de obras de habitação. Entretanto, na Europa grande parte é gerada de obras de infraestrutura, por exemplo, a quantidade média aproximada de resíduos de asfalto chega a 20%, assim percebe-se a atenção depositada nos setores de infraestrutura, particularmente no de infraestrutura viária.

## 2.5 Gerenciamento dos resíduos

Pinto (1999) relata que grande parte dos municípios brasileiros ainda atua de maneira ineficaz quanto ao sistema de gestão de RCC, e quando são resolvidos, geralmente apresentam ações emergenciais e inconvenientes. A esses procedimentos, o autor denominou de Gestão Corretiva, pois não possuem soluções que sanem o problema, apenas retiram de um determinado local e depositam em aterros ou vazadouros. Essas atividades não possuem caráter preventivo, por isso são constituídas de ações repetitivas e custosas, o que as tornam ineficientes.



Tabela 07 – Composição dos RCC em alguns países da Europa.

Composição	Resíduos (%)						
	Holanda (2001)	Dinamarca (2003)	Estônia (2006)	Finlândia (2006)	República Tcheca (2006)	Espanha (2005)	Alemanha (2007)
Concreto	40	32	17	33	33	12	70
Alvenaria	25	8	-	-	35	54	-
Diferentes resíduos mineraiis	2	-	-	-	-	9	-
Resíduos mineraiis totais	67	40	17	33	68	75	70
Concreto Asfáltico	26	24	9	-	-	5	27
Madeira	2	-	-	41	-	4	-
Metais	1	-	40	14	-	3	0,4
Gipsita	-	-	-	-	-	0,2	-
Plásticos	-	-	-	-	-	2	-
Diversos	7	36	34	12	32	12	3

Fonte: Coronado et al. (2011).

Um exemplo da Gestão Corretiva é a existência de locais de disposição irregular para pequenos volumes de resíduos, chamados de “bota-fora”. Com o tempo, esses locais podem acumular grandes quantidades ou receber incessantes volumes de resíduos, tornando-se um aterro clandestino. Isso propiciará impactos significativos em todo o ambiente urbano, principalmente no seu entorno (CASSA et al., 2001).

Não há como tolerar que municípios brasileiros permitam a Gestão Corretiva dos RCC, pois a elevada geração dos mesmos, e os impactos por eles causados, são prejudiciais ao meio ambiente e, por conseguinte, à saúde pública. Já a remoção dos RCC de locais impróprios onera os aportes financeiros municipais (CASSA et al., 2001).

Devido à necessidade de soluções duráveis para a absorção eficiente dos resíduos, Pinto (1999) propôs a chamada Gestão Diferenciada, que busca constituir um modelo sustentável por meio de um conjunto de ações, que visam à:

- **Captção máxima dos resíduos gerados** - Através da constituição de redes de áreas de atração, diferenciadas para pequenos e grandes geradores/coletores;
- **Reciclagem dos resíduos captados** - Em áreas perenes especialmente definidas para essa tarefa;

- **Alteração de procedimentos e culturas** - No tocante à intensidade da geração, à correção da coleta e da disposição e às possibilidades de utilização dos resíduos reciclados.

Pinto (1999 apud PIOVESAN Jr, 2007) destaca que as ações da Gestão Corretiva são fundamentadas em procedimentos que consolidam a sustentabilidade ambiental como principal objetivo da gestão de resíduos, os quais são baseados nos seguintes processos:

- **Facilitação da disposição** – Esse objetivo é atingido por meio da construção de uma rede de atração de resíduos. Essa rede é constituída basicamente por Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), os quais são dispositivos dedicados a receber os resíduos de pequenos geradores, e por áreas licenciadas para receber os RCC transportados pelos chamados “tele entulhos”, pelos geradores e também os resíduos advindos dos PEVs;
- **Segregação na captação** – Criação e estruturação de procedimentos e regras, que visam à segregação do resíduo no local de geração. Basicamente, isto é alcançado com o estabelecimento de regras de transporte e aceitação dos RCC nos locais licenciados para o recebimento dos resíduos. Além disso, deve-se proibir a disposição dos RCC em lixões, aterros controlados e/ou aterro sanitários.
- **Reciclagem para alteração da destinação** – A sustentabilidade ambiental da gestão dos RCC é alicerçada, principalmente, na construção de áreas de reciclagem dos resíduos. O objetivo disto é a criação de áreas perenes de recebimento de RCC, por meio da substituição de aterramento contínuo de materiais plenamente reaproveitáveis, com a inserção de resíduos reciclados no mercado.

A mudança do modelo de gestão para o apresentado por Pinto (1999 apud PIOVESAN Jr, 2007), propicia as seguintes vantagens:

- Redução dos custos municipais com a limpeza urbana;
- Preservação dos sistemas de aterros;

- Redução de RCC gerados na fonte, com o estabelecimento das regras de aceitação dos resíduos em áreas específicas;
- Incentivo a reinserção de um resíduo com grande possibilidade de reciclagem;
- Melhoria na limpeza urbana;
- Preservação da paisagem e da qualidade de vida nos ambientes urbanos.

Pinto (1999) demonstra, utilizando dados hipotéticos, a sustentabilidade econômica da substituição da Gestão Corretiva para Gestão Diferenciada (Tabela 08). Conforme esse estudo é possível ressaltar que a Gestão Diferenciada é atraente para as cidades de médio e grande porte, que são as maiores geradoras de RCC. Assim, além da diminuição de custos e impactos ambientais, pode-se promover a reciclagem dos RCC e viabilizar a produção de agregados reciclados.

Tabela 08 – Comparação entre tipos de gestão.

<b>Municipalidade em situação hipotética</b>	
População – 414.188 habitantes	
Remoção de RCC em deposições irregulares - 132 t/dia	
Consumo típico de agregados convencionais - 357 t/dia	
Geração de RCC – 857 t/dia	
Rede de atração de RCC – 13 áreas	
Central de reciclagem com capacidade de produção de 260 t/dia	
<b>Parâmetros da Gestão Corretiva</b>	
Custo remoção	R\$ 11,22/t
Custo Mensal da correção	R\$ 38.373,00
Custo mensal com aterramento	R\$ 1.560,00
Custo de aquisição de agregados convencionais	R\$ 12,51/t
Custo mensal de aquisição de agregado	R\$ 84.568,00
Custo total da gestão corretiva	<b>R\$ 124.501,00</b>
<b>Parâmetros da Gestão Diferenciada</b>	
Custo mensal da remoção de resíduos denso	R\$ 7,60/t
Custo mensal da remoção de resíduos leve	R\$ 8,40/t
Custo mensal da rede de atração	R\$ 14.300,00
Custo Mensal da Gestão	R\$ 24.065,00
Custo mensal com aterramento	R\$ 125,00
Custo da reciclagem	R\$ 5,00/t
Custo mensal da reciclagem	R\$ 33.880,00
Custo total da gestão diferenciada	<b>R\$ 72.290,00</b>

Fonte: Adaptado de PINTO (1999).

O custo associado às práticas de gerenciamento e gestão dos RCC reflete-se na escolha das alternativas a serem implantadas, bem como nas políticas que serão adotadas. Um município de pequeno porte possivelmente não sustentará uma usina de reciclagem e produção de agregados reciclados. No entanto, os municípios de grande porte sustentam numerosos gastos para remoção de resíduos de áreas irregulares. Assim, cada município deve atentar para todos os fatores que influenciam na escolha de um plano de gestão de resíduos (PINTO, 1999).

Pinto (1999) acrescenta que se deve atentar para os custos diretos e indiretos nos programas de gestão de RCC, tanto para empresas quanto para as municipalidades. Como exemplo de custos diretos, citam-se as despesas de disposição de resíduos em aterros, as quais incluem tratamento, embalagens, transporte, licenciamento ambiental, etc. Além disso, como custos indiretos, menciona-se o desgaste da imagem da empresa devido à sua gestão ambiental ineficiente, que pode levar a confrontos com organizações sociais, e com isso proporcionar a perda de consumidores.

Segundo Pinto (2005), os sistemas de gestão de resíduos são constituídos por três agentes: órgão público, geradores de resíduos e transportadores. Para que sejam eficientes e apresentem viabilidade, eles devem atuar de modo integrado. Dessa forma, os geradores devem ser responsáveis pelo cumprimento das ações especificadas na legislação, os transportadores devem conduzir os resíduos até um local licenciado, e os órgãos públicos devem controlar e fiscalizar essas ações.

Para que se tenha um sistema de gestão de resíduos eficiente, é preciso começar o processo pelas próprias obras. Nesse enfoque, Pinto (2005), por meio da Tabela 09, apresenta os resultados obtidos com a implantação desse processo em empresas pertencentes ao SINDUSCON de São Paulo. De maneira geral, a organização nos canteiros propiciou a redução na geração de RCC, bem como o reaproveitamento na própria obra. Já os aspectos críticos estavam condicionados a ineficiência na logística, no gerenciamento e no treinamento da mão de obra.

Schenini et al. (2004, apud SANTOS, 2007) relatam que a cidade de Londres adota medidas que incentivam a reciclagem e a reutilização de agregados reciclados na construção civil. Tais medidas demonstram a importância da integração entre os órgãos públicos e a iniciativa privada nos sistemas de gerenciamento e gestão de RCC. São destacados como principais fatores dessa parceria:

- a) As construtoras pagam uma taxa por todo entulho gerado na obra, o que visa incentivar a não geração de resíduos e reduzir o desperdício e os impactos que seriam gerados pelos resíduos;
- b) A redução da taxa para as construtoras que realizam coleta seletiva dos RCD em suas obras;
- c) Alguns órgãos públicos pagam até 10% a mais para as construtoras que empreguem materiais reciclados;
- d) O incentivo do estado à máxima utilização de materiais de demolição. Um sistema de permuta é utilizado pelos construtores com a divulgação prévia de uma determinada demolição. Um tipo de classificado de materiais de demolição;
- e) Os arquitetos e engenheiros são estimulados a projetarem considerando uma vida útil de 100 ou 150 anos e prever o reaproveitamento das peças demolidas;
- f) Incentivo a utilização de agregados reciclados de concreto na produção de concretos de baixa resistência, sub-base de estradas, etc.

Tabela 09 – Aspectos positivos e críticos da implantação de sistemas de gestão de RCC em canteiros de obras.

<b>ASPECTOS POSITIVOS</b>
Redução dos custos de coleta
Redução do desperdício (menor geração de resíduos)
Reaproveitamento dos resíduos dentro da própria obra
Limpeza e organização nos canteiros
Redução dos riscos de acidentes de trabalho
<b>ASPECTOS CRÍTICOS</b>
Treinamento da mão de obra
Correta aquisição de dispositivos de coleta
Atendimento insatisfatório das empresas coletoras e transportadoras
Controle dos registros das destinações dos resíduos
Defasagem na execução da limpeza com relação ao serviço executado
Comprometimento da direção da empresa e da gerência da obra

Fonte: Adaptado de Pinto (2005).

A Tabela 10 evidencia de forma indireta os métodos de gerenciamento de resíduos aplicados nas cidades brasileiras. Com relação à forma de disposição dos RCC no solo, os dados demonstram que 20% dos municípios descartam os RCC juntamente com o lixo doméstico, 33% possui algum controle específico, tais como aterro, área transitória ou local de estocagem, e apenas 42% desses realizam triagem e/ou reciclagem. Embora os dados comprovem que 72% dos municípios brasileiros possuam regulamento acerca dos sistemas de gerenciamento, o mesmo não se pode dizer da região sul, que possui a menor contribuição, cerca de 53%.

Segundo Mariano (2008), o que torna um plano de gerenciamento de RCC eficaz é a execução das medidas propostas antes mesmo do começo da obra, ou seja, na qualificação daqueles que irão executá-la. Com dados referentes aos principais constituintes de uma obra de aproximadamente 4000m<sup>2</sup> (Tabela 06), o autor descreve que, após o treinamento da mão de obra, a eficiência do programa de gerenciamento de resíduos na obra foi de aproximadamente 96%. Com a reutilização dos RCC na própria obra, os custos com aquisição de material diminuiram e, por conseguinte, os gastos com destinação final também.

Solis-Guzman et al. (2009) mencionam que o governo da Espanha aplicou um decreto que regulamenta o manuseio de resíduos em todo país. O regulamento exige a elaboração de um estudo que contemple todo o processo de gerenciamento dos RCC na respectiva obra durante a fase de projeto, assim como responsabiliza empreiteiros e responsáveis técnicos pela preparação deste. Essas duas partes são obrigadas a obter uma licença de construção que deve conter a estimativa do fluxo de resíduos e também do seu custo de tratamento.

Recentemente, o governo brasileiro liberou verbas para a execução de programas de gestão de RCC. A medida estimulou entidades públicas e privadas a elaborar metodologias inovadoras para que possam ser beneficiadas. No entanto, esta iniciativa chegou tardiamente, visto que estas deveriam ser tomadas em paralelo ao crescimento do setor da construção civil e não, 10 anos após as primeiras regulamentações acerca dos RCC. Assim, conclui-se que houve uma grande quantidade de impactos ambientais, danos à saúde pública, entre outros aspectos, que poderiam ser amenizados se o governo tivesse proporcionado a atenção necessária à problemática que envolve os RCC desde o princípio (CEF, 2011).

Tabela 10 – Municípios, total e com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição, por forma de disposição no solo, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação – 2008.

		Municípios								
		Com serviço de manejo dos resíduos de construção e demolição								
Grandes Regiões e Unidades da Federação	Total	Forma de disposição no solo								
		Total	Disposição em vazadouro, em conjunto com os demais resíduos	Disposição/ utilização sob controle em aterro convencional, em conjunto com os demais resíduos	Disposição sob controle, em pátio ou galpão de estocagem da prefeitura, específico para resíduos especiais	Disposição transitória sob controle, em aterro da prefeitura específico para resíduos especiais	Disposição transitória sob controle, em aterro de terceiros específico para resíduos especiais	Utilização definitiva e sob controle dos resíduos como material de aterro, pela prefeitura, após triagem e remoção dos resíduos classes B, C e D	Utilização definitiva e sob controle dos resíduos como material de aterro, por terceiros, após triagem e remoção dos resíduos classes B, C e D	Outra
<b>Brasil</b>	<b>5 564</b>	<b>4 031</b>	<b>1 330</b>	<b>442</b>	<b>176</b>	<b>267</b>	<b>181</b>	<b>503</b>	<b>292</b>	<b>1 235</b>
<b>Norte</b>	<b>449</b>	<b>293</b>	<b>148</b>	<b>27</b>	<b>5</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>16</b>	<b>12</b>	<b>71</b>
RO	52	28	7	5	3	-	-	-	-	7
AC	22	6	5	-	-	-	-	-	-	1
AM	62	39	11	3	-	2	3	6	4	12
RR	15	1	-	-	-	-	-	-	-	1
PA	143	117	61	5	2	5	4	9	8	36
AP	16	4	4	-	-	-	-	-	-	-
TO	139	98	60	14	-	6	4	1	-	14
<b>Nordeste</b>	<b>1 793</b>	<b>1 454</b>	<b>744</b>	<b>92</b>	<b>21</b>	<b>46</b>	<b>56</b>	<b>143</b>	<b>114</b>	<b>391</b>
MA	217	139	114	3	2	1	2	2	4	22
PI	223	121	99	2	-	2	-	-	2	21
CE	184	167	50	8	-	8	15	24	27	43

Tabela 10 – Municípios, total e com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição, por forma de disposição no solo, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação – 2008 (continuação).

RN	167	141	65	6	3	4	5	36	6	31
PA	223	189	77	4	1	2	2	7	1	108
PE	185	157	52	14	1	5	4	22	19	52
AL	102	87	46	10	6	4	7	10	6	13
SE	75	69	34	3	-	2	4	10	10	12
BA	417	384	207	42	8	18	17	32	39	89
<b>Sudeste</b>	<b>1 668</b>	<b>1 272</b>	<b>207</b>	<b>202</b>	<b>105</b>	<b>126</b>	<b>65</b>	<b>220</b>	<b>97</b>	<b>391</b>
MG	853	682	153	127	32	49	22	130	64	172
ES	78	60	6	8	1	-	5	19	7	22
RJ	92	64	16	9	3	8	4	11	3	19
SP	645	466	32	58	69	69	34	60	23	178
<b>Sul</b>	<b>1 188</b>	<b>639</b>	<b>77</b>	<b>74</b>	<b>33</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>73</b>	<b>51</b>	<b>284</b>
PR	399	272	46	29	25	19	19	19	9	114
SC	293	111	8	10	4	4	8	6	12	65
RS	496	256	23	35	4	14	10	48	30	105
<b>Centro-Oeste</b>	<b>466</b>	<b>373</b>	<b>154</b>	<b>47</b>	<b>12</b>	<b>45</b>	<b>12</b>	<b>51</b>	<b>18</b>	<b>98</b>
MS	78	60	11	3	5	25	1	14	-	10
MT	141	80	41	16	5	11	3	4	4	2
GO	246	232	101	27	2	8	8	33	14	85
DF	1	1	1	1	-	1	-	-	-	1

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.



Miranda et al. (2009), ao analisar de uma obra de 11.984m<sup>2</sup> situada no município de São Paulo, relatam que técnicas simples de gerenciamento de resíduos propiciam uma significativa diminuição nos custos finais da obra. Primeiramente, os autores analisaram a economia propiciada pela prática da triagem, o que possibilita a redução do volume de resíduos, decorrente, principalmente, da redução do empolamento. Define-se como empolamento o aumento do volume do RCC devido à má organização deste dentro das caçambas estacionárias, formando grandes vazios. Pode ser causado, por exemplo, por grandes pedaços de madeira, metais, concreto, etc. Segundo a Tabela 11, os resultados demonstraram que, com a prática da triagem, a redução dos custos de remoção pode chegar a mais de 30%.

Sob o mesmo aspecto, os autores ressaltam que um programa de gestão de RCC só se torna eficiente se houver a conscientização dos funcionários quanto ao desperdício, tal fato pode auxiliar na redução da geração de RCC no canteiro. Dessa forma, os autores analisaram a economia propiciada pela diminuição do volume de RCC com relação à massa gerada por metro quadrado, os resultados mostram que a economia obtida com essa técnica pode chegar a 47% (Tabela 12) (MIRANDA et al., 2009).

Tabela 11 – Exemplos de redução do custo, considerando diferentes reduções do empolamento.

Redução de volume		10%	15%	20%	25%
Custo estimado da remoção de RCD (R\$/m <sup>2</sup> de obra)	Sem triagem	5,46	5,78	6,14	6,55
	Com triagem		4,46		
Redução estimada de custos (%)		18,3	22,8	27,4	31,9

Fonte: Miranda et al. (2009).

Tabela 12 – Redução total de custo associada à redução da massa de resíduos gerada por m<sup>2</sup> de construção.

Redução do empolamento	10%	15%	20%	25%
Custo total estimado a 150 kg/m <sup>2</sup> (R\$)	84.743,16	89.728,05	95.336,05	101.691,79
Redução total estimada de custos (R\$)	31.263,16	36.248,05	41.856,05	48.211,79
Redução total estimada de custos (%)	36,89	40,40	43,90	47,41

Fonte: Miranda et al. (2009).

Como ferramenta de auxílio às obras, Pinto (2005) expõe técnicas adotadas pelo SINDUSCON de São Paulo que, como resultado de experiências de gestão,

desenvolveu um manual de manejo de resíduos sólidos, com objetivo de auxiliar na gestão ambiental dos RCC. A partir desse manual, é possível encontrar orientações de destinação para os resíduos conforme tecnologia apropriada (Tabela 13), o mesmo também demonstra as formas para disposição final de resíduos das obras (Tabela 14), associada à viabilidade econômica e técnica disponível.

Tabela 13 – Soluções de destinação para os resíduos.

TIPOS DE RESÍDUO	CUIDADOS REQUERIDOS	DESTINAÇÃO
Blocos de concreto, blocos cerâmicos, argamassas, outros componentes cerâmicos, concreto, tijolos e assemelhados.	Privilegiar soluções de destinação que envolvam a reciclagem dos resíduos, de modo a permitir seu aproveitamento como agregado.	Áreas de Transbordo e Triagem, Áreas para Reciclagem ou Aterros de resíduos da construção civil licenciadas pelos órgãos competentes; os resíduos classificados como classe A (blocos, reciclados para uso em pavimentos e concretos, telhas, argamassa e concreto em geral) podem ser sem função estrutural.
Madeira	Para uso em caldeira, garantir separação da serragem dos demais resíduos de madeira.	Atividades econômicas que possibilitem a reciclagem destes resíduos, a reutilização de peças ou o uso como combustível em fornos ou caldeiras.
Plásticos (embalagens, aparas de tubulações etc.)	Máximo aproveitamento dos materiais contidos e a limpeza da embalagem.	Empresas, cooperativas ou associações de coleta seletiva que comercializam ou reciclam estes resíduos.
Papelão (sacos e caixas de embalagens) e papéis (escritório)	Proteger de intempéries.	Empresas, cooperativas ou associações de coleta seletiva que comercializam ou reciclam estes resíduos.
Metal (ferro, aço, fiação revestida, arames etc.)	Não há.	Empresas, cooperativas ou associações de coleta seletiva que comercializam ou reciclam estes resíduos.
Serragem	Ensacar e proteger de intempéries.	Reutilização dos resíduos em superfícies impregnadas com óleo para absorção e secagem, produção de briquetes (geração de energia) ou outros usos.
Gesso em placas acartonadas	Proteger de intempéries.	É possível a reciclagem pelo fabricante ou empresas de reciclagem.
Gesso de revestimento e artefatos	Proteger de intempéries.	É possível o aproveitamento pela indústria gesseira e empresas de reciclagem.
Solo	Examinar a caracterização prévia dos solos para definir destinação.	Desde que não estejam contaminados, destinar a pequenas áreas de aterramento ou em aterros de resíduos da construção civil, ambos devidamente licenciados pelos órgãos competentes.
Telas de fachada e de proteção	Não há.	Possível reaproveitamento para a confecção de bags e sacos ou até mesmo por recicladores de plásticos.
EPS (poliestireno expandido - exemplo: isopor)	Confinar, evitando dispersão.	Possível destinação para empresas, cooperativas ou associações de coleta seletiva que comercializam, reciclam ou aproveitam para enchimentos.
Materiais, instrumentos e embalagens contaminados por resíduos perigosos	Maximizar a utilização dos materiais para a redução dos resíduos a descartar.	Encaminhar para aterros licenciados para recepção de resíduos perigosos.

Fonte: Adaptado de Pinto (2005).

Tabela 14 – Possíveis formas de disposição dos RCC.

TIPO DE ÁREA	DESCRIÇÃO	CONDIÇÃO PARA UTILIZAÇÃO	OBSERVAÇÕES
<b>Pontos de entrega de pequenos volumes de RCC</b>	Área pública e/ou viabilizada pela administração pública apta para receber RCC de pequenos geradores (V=1,00m <sup>3</sup> )	Disponibilizada pela administração pública local como parte integrante do Programa de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil	Restrição ao recebimento de cargas de RCC predominante de Classe C (gesso, isopor, etc.) e Classe D (resíduos perigosos, tais como: tintas, solventes, resíduos de instalações industriais e etc.)
<b>Área de Transbordo e Triagem - ATT</b>	Estabelecimento público e/ou privado destinado ao recebimento de RCC e resíduos volumosos gerados ou coletados por agentes privados, e que deverão ser usadas para triagem dos resíduos recebidos, eventual transformação e posterior remoção para adequada disposição	Área licenciada pelo órgão ambiental, municipal e/ou estadual	A restrição de recebimento de resíduos deverá constar na Licença de Operação ambiental da ATT
<b>Área de reciclagem</b>	Estabelecimento privado ou público destinado à transformação dos resíduos Classe A em agregados	Área licenciada por órgão ambiental competente	Restrição de resíduos da construção civil Classe B, C e D.
<b>Aterros de Resíduos da Construção Civil</b>	Estabelecimento público ou privado onde será empregadas técnicas de disposição de RCC classe A no solo, visando à reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro e/ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente	Área licenciada por órgão ambiental competente	Restrição de aterramentos de resíduos da construção civil Classe B, C e D. Estes resíduos poderão apenas ser transbordados na área
<b>Aterros para resíduos industriais</b>	Área licenciada para recebimento de resíduos Classe I e II (NBR 10004:2004, classificação antiga)	A área deve estar licenciada pelo órgão ambiental competente	Caracterização prévia dos resíduos definirá se deverão ser destinados diretamente para aterros de resíduos Classe I e II
<b>Agentes diversos</b>	Sucateiros, cooperativas, grupos de coleta seletiva e outros agentes que comercializam recicláveis	Contrato social ou congênere, alvará de funcionamento e inscrição municipal	Em caso de necessidade de utilização de agentes informais, reconhecer o destino a ser dado ao resíduo e registrá-lo da maneira mais segura ao gerador

Fonte: Adaptado de Pinto (2005).

## 2.6 Reciclagem

Para que a indústria da construção civil atinja patamares sustentáveis, essa deve investir maciçamente em tecnologias que possibilitem a utilização de materiais recicláveis. Para que isso aconteça, que é necessário fazer um diagnóstico da geração dos resíduos nos municípios que pretendem utilizar os RCC como substituição parcial ou total da matéria prima na confecção de componentes, pois se

a produção mínima não for atingida, esses componentes poderão ter um custo maior que os já consolidados (VÁZQUEZ, 2001; XAVIER, 2002).

Historicamente, o reaproveitamento dos resíduos, mesmo de maneira simplista, ocorreu desde que a população se deparou com a escassez de matérias primas e dificuldades na deposição desses resíduos. O que implicou o desenvolvimento de técnicas para reaproveitamento desses materiais (VON STEIN, 2000). Um exemplo da reutilização dos RCC aconteceu na Europa e no Japão após a Segunda Guerra Mundial, durante o período de reconstrução das cidades era necessário remover o entulho e atender uma demanda exagerada de materiais de construção (NATAATMADJA e TAN, 2001). Nesse período, com as economias fragilizadas pela guerra, o reaproveitamento dos RCC possibilitou não só a limpeza das cidades, como também contribuiu para a economia na compra de materiais (SCHULZ e HENDRICKS, 1992). Já na Europa, o sistema viário foi tratado com prioridade, países como Alemanha e França foram pioneiros no desenvolvimento de técnicas que permitiram a reciclagem dos RCC para uso em pavimentação e construção civil (VON STEIN, 2000).

Todos os processos de reciclagem estão condicionados a viabilidade financeira do empreendedor ou órgão público. A partir dela é determinada a metodologia que compreenderá o processo de reciclagem. Isto é, como em qualquer usina, a qualidade do agregado é delimitada pelo número de processos que o material é submetido desde o início do beneficiamento até ser disponibilizado para o uso (JOHN, 2001). Do mesmo modo, Xavier (2002) destaca que para o reaproveitamento adequado dos RCC é necessário dispositivos para seleção, britagem e graduação do material.

Cassa et al. (2001) dividem a reciclagem dos RCC em primária e secundária. A reciclagem primária ocorre no mesmo local que originou o resíduo, enquanto que a reciclagem secundária acontece fora do processo responsável pela sua geração. De acordo com essas definições é possível constatar que a reciclagem secundária é mais vantajosa econômica e tecnicamente, pois a primeira é limitada em fatores como a quantidade gerada e a tecnologia construtiva utilizada na obra. Já a secundária recebe uma entrada hipoteticamente contínua de resíduos provenientes de diferentes obras, o que mantém constante a produção dos agregados. Por receber resíduos de diversas obras, a reciclagem secundária pode apresentar uma variabilidade maior na composição dos agregados reciclados.

Para obtenção de agregados reciclados de melhor qualidade, os RCC encaminhados para reciclagem devem ser triados e separados conforme tipologias de resíduos Classe A. Esses devem estar isentos de impurezas como resíduos de outras classes, matéria orgânica, RSU, entre outros. Após essa triagem, pode-se iniciar o processo de reciclagem, seguido pelo peneiramento e estocagem do agregado reciclado. Em suma, a reciclagem dos RCC é semelhante com a produção de agregados convencionais, provenientes das pedreiras (PIOVEZAN, 2007).

Embora os processos de reciclagem dos RCC não sejam recentes no Brasil, o uso dos agregados reciclados ainda é limitado devido ao ineficiente processo de separação e segregação dos agregados nas usinas. Isto acontece pela falta de tecnologia aplica nas estações de reciclagem que, pela não garantia de retorno financeiro, utilizam equipamentos de baixo custo, obsoletos ou simplórios, para realizar os processos (TÉCHNE, 2006).

Outro benefício da reciclagem dos RCC é que eles podem ser incorporados a outros tipos de resíduos. É o caso dos resíduos sólidos das indústrias siderúrgicas, onde seus resíduos podem ser reaproveitados como constituintes de massas cerâmicas para fabricação de diversos produtos, como telhas, tijolos, blocos, entre outros (OLIVEIRA & HOLANDA, 2004). Outro exemplo, destacado por Moura et al. (2002), são os resíduos proveniente do corte de mármore e granito. Esses resíduos apresentam viabilidade técnica para serem incorporados, em pequenas proporções, como agregado miúdo para argamassas de revestimento, como também na produção de lajotas.

Zordan (1997) cita que a reciclagem dos RCC, e posterior reutilização na produção de componentes para construção civil, pode aumentar a oferta de materiais de construção, o que também pode ocasionar a redução do preço dos componentes frequentemente utilizados. De conformidade, John (1996, apud ZORDAN, 1997) relata que a reciclagem ainda pode gerar benefícios sociais, visto que favorece a construção de habitações simples para população de baixa renda, utilizando-se agregados de desempenho comprovado.

Os processos de beneficiamento de resíduos devem atentar para finalidade do uso dos agregados reciclados. Durante a reciclagem fração mineral deve-se atentar para presença de materiais indesejados, os quais podem comprometer o uso dos agregados. Por exemplo, se for para uso na produção de concretos e argamassa, os teores de sulfato, presentes em componentes de gesso, devem ser

retirados no processo de triagem, ou controlados se passarem para outros estágios da britagem (ANGULO et al., 2001).

Em virtude da variabilidade de seus componentes, a reciclagem dos RCC apresenta restrições tanto nos processos de obtenção, quanto no seu uso. Devido a fatores técnicos que limitam a utilização desses materiais, há certo receio na implantação das usinas de beneficiamento como também a sua reutilização na construção civil por ser uma “reciclagem de baixo valor”, ou seja, esse produto só poderia ser usado para uso secundário, como, por exemplo, material de aterro (HENDRIKS, 2000).

Por outro lado, Angulo et al. (2002) relatam que, se 100% dos RCC fossem reciclados, a área de pavimentação poderia absorver até 50% desses agregados. Isso mostra que há um mercado promissor para utilização dos resíduos. No entanto, para que isso aconteça, são necessárias aplicações tecnológicas nos processos de beneficiamento, principalmente na triagem. Assim, os agregados reciclados seriam classificados com padrões mais rígidos de qualidade, impulsionando outras áreas da construção civil utilizar esse material.

Para que o processo de reciclagem seja autossustentável, o produto deve proporcionar interesse financeiro ao consumidor e, por conseguinte, oferecer um retorno atrativo ao empreendedor. Hartlén (1996) cita que ao aumentar os custos dos impostos para disposição dos RCC em aterros, pode-se criar uma política eficiente para incentivar a reciclagem e, a partir de técnicas consolidadas de reutilização, os agregados reciclados poderiam entrar em escala comercial.

Apesar da dificuldade em manter uma usina de reciclagem, as taxas de reciclagem de RCC estão em ascensão. Na Europa, a média varia em torno de 25% (SOLIS-GUZMAN et al. 2009), já em outros países podem chegar a 80%, como acontece na Dinamarca e na Holanda (CHINI, 2005). A Tabela 16 demonstra, entre outros aspectos, que a média Europeia aumentou e que os países de economia consistente investem em alternativas para reciclar seus resíduos e preservar as reservas de matéria prima, enquanto os demais - caracterizados por possuírem economia oscilante (ou instável), não possuem recursos para investir ativamente no setor, e assim sofrem as consequências da disposição irregular de RCC.

Os valores representados na Tabela 15 são reflexos das severas regulamentações que os RCC são submetidos. Torgal e Jalali (2011) citam que, em 1996, a Indústria alemã aceitou reduzir pela metade os RCC que foram depositados

em aterros. Em 1997, o governo da Finlândia decidiu que 50% dos RCC devem ser reciclados até o ano 2000. Em 2008, a União Europeia aprovou uma diretiva que estabelece que, até o ano 2020, o percentual mínimo de reciclagem dos RCC deve ser de pelo menos 70% em peso.

Tabela 15 – Taxas de reciclagem de RCC na Europa.

Países	Índice de reciclagem (%)
Bélgica	Acima de 90
Dinamarca, Estônia, Alemanha, Irlanda e Holanda	Acima de 70
Áustria, França, Lituânia e Inglaterra	60-70
Luxemburgo, Letônia e Eslovênia	40-60
Média dos países da União Europeia	47
República Tcheca, Finlândia, Chipre, Grécia, Hungria, Polônia, Portugal e Espanha	Abaixo de 40
Bulgária, Itália, Malta, Romênia, Eslováquia e Suécia	Indisponíveis

Fonte: Sonigo et al. (2010).

Em 1991, o governo do Japão aprovou leis de reciclagem que estabeleciam objetivos mínimos para vários componentes que compõe os RCC (KAWANO, 2002). Essa regulamentação só foi possível pela conscientização da população, que se reverteu no apoio a essa metodologia de gerenciamento dos RCC. Tal adesão resultou no aumento significativo das percentagens de reciclagem desses materiais (Figura 04).

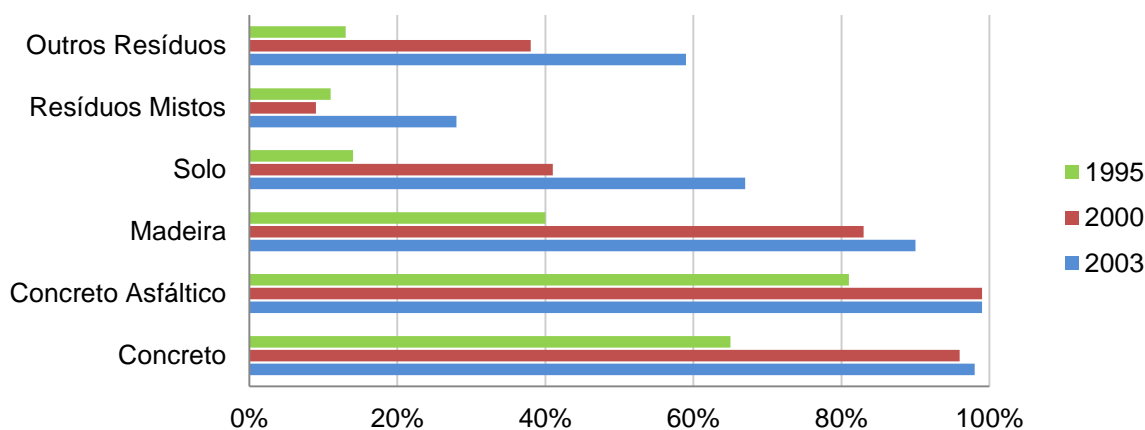


Figura 04 – Porcentagem de materiais reciclados no Japão entre 1995 e 2000.

Fonte: Adaptado de Kawano (2002).

### 2.6.1 Demolição seletiva

Até muito recentemente os processos de demolição eram subordinados a um único princípio: minimizar o tempo gasto nesta fase da obra. Isso trouxe como consequência diferentes fluxos de resíduos, os quais acabavam todos misturados. No entanto, a necessidade de maximizar a reciclagem e reutilização dos RCC, aliada a escassez de matéria prima, forçou o aparecimento de um novo princípio chamado “Demolição Seletiva”. Esse tipo de demolição envolve a remoção dos componentes da edificação no sentido inverso da sua construção (Figura 05).

Na Europa, muitos países praticam a demolição seletiva (desconstrução ou desmontagem), a qual não mistura resíduos distintos, aumentando seu potencial de reciclagem. Esse processo reduz a necessidade de triagem, bem como a variabilidade dos lotes, e com isso diminui os custos de reciclagem (KIBERT & CHINI, 2000).

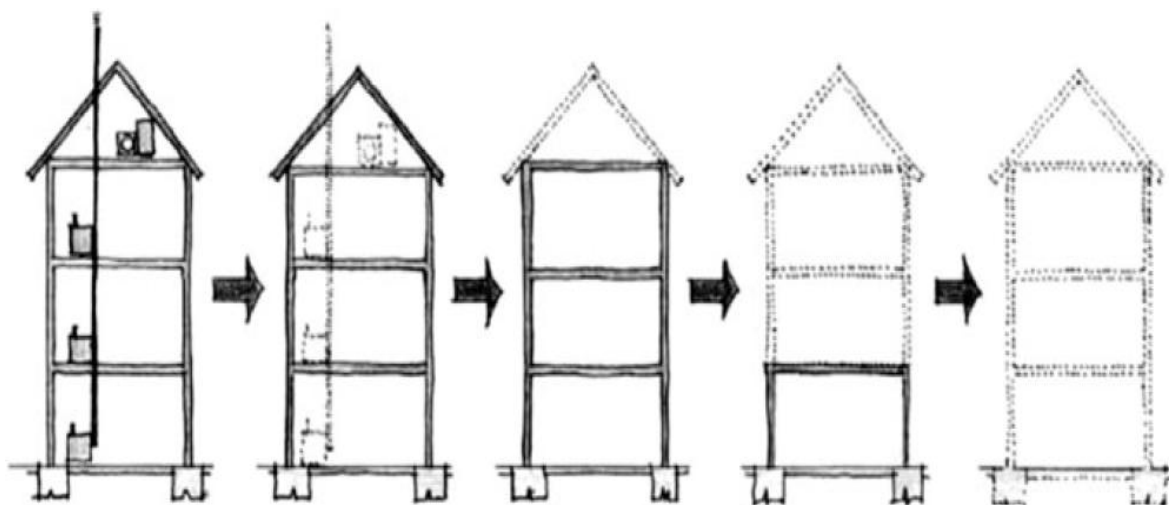


Figura 05 – Desconstrução de uma edificação utilizando demolição seletiva.  
Fonte: Torgal & Jalali (2011).

As técnicas utilizadas na demolição de uma edificação influem no percentual de resíduos passível de reciclagem. Segundo John & Angulo (2003), as demolições convencionais misturam resíduos de diversas fases da obra, o que pode contaminar os RCC entre si e com outros resíduos, perigosos ou não recicláveis.

No Brasil, o processo de desconstrução das edificações é utilizado em alguns elementos arquitetônicos, como portas, janelas, pisos, madeiramento, vidros, canos, equipamentos elétricos, entre outros. Entretanto, sobram a estrutura e a alvenaria,



as quais são responsáveis por 90% da massa dos RCC, classificados na Classe A pela Resolução 307/2002 do CONAMA - potencialmente recicláveis. Porém, como não são separados na demolição, possuem maior variabilidade e aderem a si maior número de contaminantes (DAMINELI, 2007).

Um aspecto que leva os construtores a não utilizar a demolição seletiva é que ela leva mais tempo e, portanto, é mais custosa que o método de demolição tradicional. Por isso, essa técnica pode só pode ser viável se houver leis que regulamentem a demolição seletiva, ou se a compensação financeira para esta opção for fornecida (KIBERT, 2005).

## **2.7 Usinas de beneficiamento**

O processo de beneficiamento dos RCC para transformação em agregado reciclado ocorre, geralmente, nas usinas reciclagem. Essas usinas possuem uma planta semelhante a uma usina de britagem convencional (BODI et al., 1995), pois utiliza os mesmos equipamentos. Entretanto, alguns processos de limpeza e seleção são necessários para não contaminar o produto final (LEITE, 2007).

Damineli (2007) relata que as características dos agregados reciclados estão ligados à forma com que são fabricados e, principalmente, a composição da fração mineral disponível na fabricação, seja concreto, cerâmica, rochas ou outros. O autor cita que para obter-se uma melhor qualidade nos agregados reciclados é necessário, no mínimo, que as seguintes etapas sejam adotadas nas usinas de beneficiamento:

- a) Triagem na chegada dos resíduos à central de reciclagem para separação de RCC minerais com predominância de materiais cinzas (elementos de origem cimentícia) ou vermelhos (elementos de origem cerâmica);
- b) Catação manual para retirada de elementos não-minerais e contaminantes dos montantes totais de RCC de origem mineral, cinzas ou vermelhos;
- c) Britagem dos RCC por compressão (britador de mandíbula) ou impacto (britador de impacto), gerando agregados reciclados;

- d) Eventual retirada de resíduos metálicos dos agregados com separador magnético;
- e) Peneiramento dos agregados gerados, que são divididos em faixas granulométricas.

Para a produção de um agregado reciclado de melhor qualidade, algumas usinas de beneficiamento realizam uma pré-seleção dos RCC, assim pode-se obter três diferentes produtos (ANGULO et. al., 2003):

- **Agregado reciclado de concreto:** chamado também de cinza ou branco, é principalmente composto por materiais cimentícios, como concretos e argamassas;
- **Agregado reciclado vermelho:** com predominância de materiais cerâmicos, como tijolos, telhas e pisos cerâmicos;
- **Agregado reciclado misto:** quando possui menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas é denominado misto.

Conforme relatado por Jadovski (2005), a capacidade de reciclagem de uma usina de beneficiamento é estimada baseada em fatores como:

- a) Local de instalação da usina: deve-se buscar uma localização próxima às fontes geradoras e do local de utilização do agregado reciclado. Deve-se considerar os impactos causados caso seja instaladas próximas a áreas residenciais e centrais, por exemplo, para não interferir no tráfego da vizinhança;
- b) Custos associados ao transporte: o local de instalação também deve atentar para a distância entre o local de geração, de consumo, de beneficiamento e o aterro sanitário, ao qual destinam-se poluentes como o lixo doméstico;
- c) Quantidade e qualidade dos RCC produzidos na região: esses fatores influenciam nas propriedades do agregado reciclado;
- d) Nichos de aplicação do agregado produzido: potenciais usos dos RCC reciclados delimitam o consumo do material produzido;
- e) Avaliação do projeto da usina, custo de equipamentos e despesas gerais: esses aspectos determinam a viabilidade na implantação da usina.

Segundo Wilburn & Goonan (1998), as usinas de beneficiamento devem minimizar os efeitos nocivos causados pelo ruído e pela poeira. Do mesmo modo, Lima (1999) sugere algumas medidas para amenizar o problema:

- a) Utilização de cerca viva. Essa medida ajuda a conter o ruído e a poeira, além de melhorar a imagem do local;
- b) Cobrimento do subleito com material reciclado. A aplicação de agregados reciclados compactados poderia reduzir o pó gerado pelo fluxo de veículos;
- c) Revestimento do britador com materiais que proporcionem redução de ruído;
- d) Instalação de aspersores de água nos pontos de maior geração de poeira.

Embora possam causar transtornos no seu entorno, as usinas de reciclagem devem estar localizadas próximas ao núcleo gerador, para facilitar a disposição e fornecimento do material reciclado. Assim, os custos com transporte serão reduzidos, como também o valor do agregado reciclado, o que trará sustentabilidade econômica a usina (BRITO FILHO, 1999 apud LEITE, 2001).

Jadovski (2005), após pesquisar diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem, relata que:

- a) O custo de reciclagem reduz com o aumento da capacidade de produção;
- b) Existe a necessidade da produção de grandes quantidades de agregados para que o empreendimento apresente viabilidade;
- c) Os custos de produção de agregados para produção de concreto são em torno de 35% maiores que os custos de produção de agregados para pavimentação, para usinas com mesma capacidade de produção, devido ao maior custo de aquisição dos equipamentos;
- d) Os custos de produção de uma usina de reciclagem privados são em torno de 25% maior, quando comparado com uma usina de mesma capacidade administrada por empresa pública, devido aos custos dos impostos;
- e) Uma usina de reciclagem administrada por empresa privada somente apresenta viabilidade a partir de 40 t/h, com alterações em relação aos parâmetros adotados, devido ao alto custo representado pelos impostos;

- f) Uma usina de reciclagem administrada por empresa pública somente é viável a partir de 30 t/h, com alterações nos parâmetros adotados, ou a partir de 40 t/h, sem alterações nos parâmetros adotados;
- g) Este tipo de investimento apresenta um custo de capital bastante elevado;
- h) A variação do preço de venda do agregado reciclado, por menor que seja, produz variações significativas na viabilidade econômica da usina. A indústria de agregados produz grandes volumes com valor unitário baixo, desta forma, pequenas variações nos custos de operação podem ter importante impacto no desempenho econômico das usinas.

A Tabela 16 demonstra a quantidade de municípios brasileiros que possuem serviços de manejo de RCC e seu respectivo tipo de processamento de resíduos. Os dados mostraram que aproximadamente 72% dos municípios brasileiros possuem algum tipo de legislação acerca do manejo de RCC, grande parte delas implica regulamentações sobre a deposição dos RCC em áreas de aterro. Desses, somente cerca de 7% possuem algum tipo de processamento, mesmo na sua versão mais simples, compreendendo apenas o processo de triagem. A porcentagem dos municípios que possuem processos de peneiramento e/ou reaproveitamento dos componentes varia em torno de 1,5%. Esse valor é imensamente inferior a índices internacionais, onde, por exemplo, a média de reciclagem da União Europeia é de 47% (SONIGO et. al., 2010).

Segundo a Tabela 17, Miranda et al.(2009) apresentam a situação das usinas de reciclagem de resíduos Classe A no Brasil até o ano de 2008. Os autores descrevem que antes da publicação da Resolução 307 do CONAMA em 2002, o Brasil possuía apenas 16 usinas, com uma taxa de crescimento de 3 usinas inauguradas a cada ano. Após a regulamentação passou a ser instalado de 3 a 9 usinas por ano. Atualmente, já podem ser citadas pelo menos 47 usinas de reciclagem, sendo 24 públicas (51% do total) e 23 privadas (49% restante). Das 36 usinas que estão em operação ou em instalação, 15 (42%) são públicas e 21 (58%) são privadas (Figura 06). No que se referem às usinas públicas, ao menos dez estão situadas em municípios que possuem um plano de gerenciamento de RCC, os quais proporcionam viabilidade econômica a tais investimentos.

Tabela 16 – Municípios, total e com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição, por existência e tipo de processamento dos resíduos, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação – 2008.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Municípios							
	Com serviço de manejo dos resíduos de construção e demolição							
	Existência e tipo de processamento dos resíduos							
	Total	Total	Total	Triagem simples dos resíduos de construção e demolição reaproveitáveis (classes A e B)	Triagem e trituração simples dos resíduos classe A	Triagem e trituração dos resíduos classe A, com classificação granulométrica dos agregados reciclados	Reaproveitamento dos agregados produzidos na fabricação de componentes construtivos	Outro
<b>Brasil</b>	<b>5 564</b>	<b>4 031</b>	<b>392</b>	<b>124</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>79</b>	<b>204</b>
<b>Norte</b>	<b>449</b>	<b>293</b>	<b>29</b>	<b>5</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>6</b>	<b>18</b>
RO	52	28	9	-	-	-	3	6
AC	22	6	-	-	-	-	-	-
AM	62	39	6	3	-	-	2	1
RR	15	1	1	-	-	-	1	-
PA	143	117	12	2	-	-	-	10
AP	16	4	-	-	-	-	-	-
TO	139	98	1	-	-	-	-	1
<b>Nordeste</b>	<b>1 793</b>	<b>1 454</b>	<b>178</b>	<b>38</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>32</b>	<b>118</b>
MA	217	139	6	3	2	1	-	3
PI	223	121	1	-	-	-	-	1
CE	184	167	31	2	-	1	2	28
RN	167	141	42	4	-	-	3	38
PA	223	189	6	4	1	1	1	3
PE	185	157	23	5	-	1	5	12
AL	102	87	22	9	1	2	10	6
SE	75	69	5	-	-	-	-	5
BA	417	384	42	11	-	-	11	22
<b>Sudeste</b>	<b>1 668</b>	<b>1 272</b>	<b>109</b>	<b>50</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>25</b>	<b>38</b>
MG	853	682	45	15	2	2	11	19
ES	78	60	3	2	-	-	-	1
RJ	92	64	9	6	1	-	1	1
SP	645	466	52	27	4	10	13	17
<b>Sul</b>	<b>1 188</b>	<b>639</b>	<b>54</b>	<b>24</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>14</b>	<b>16</b>
PR	399	272	22	10	-	1	6	6
SC	293	111	11	4	3	1	2	4
RS	496	256	21	10	-	-	6	6
<b>Centro-Oeste</b>	<b>466</b>	<b>373</b>	<b>22</b>	<b>7</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>14</b>
MS	78	60	10	1	-	-	-	10
MT	141	80	5	1	-	-	2	2
GO	246	232	6	4	-	-	-	2
DF	1	1	1	1	-	-	-	-

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.

Tabela 17 – Usinas de reciclagem do país em novembro de 2008.

Cidade	Propriedade	Instalação	Capacidade (t/d)	Situação
São Paulo/SP	Prefeitura	1991	100	Desativada
Londrina/PR	Prefeitura	1993	20	Desativada
B. Horizonte (Estoril)	Prefeitura	1994	30	Operando
B. Horizonte (Pampulha)	Prefeitura	1996	20	Operando
Ribeirão Preto/SP	Prefeitura	1996	30	Operando
Piracicaba/SP	Autarquia/Emdhap	1996	15	Operando
São José dos Campos/SP	Prefeitura	1997	30	Desativada
Muriae/MG	Prefeitura	1997	8	Desativada
São Paulo/SP	ATT Base	1998	15	Desativada
Macaé/RJ	Prefeitura	1998	8	Desativada
São Sebastião/DF	Adm. Regional	1999	5	Desativada
Socorro/SP	Irmãos Preto	2000	3	Operando
Guarulhos/SP	Prefeitura/Proguaru	2000	15	Operando
Vinhedo/SP	Prefeitura	2000	15	Operando
Brasília/DF	Caenge	2001	30	Operando
Fortaleza/CE	Usifort	2002	60	Operando
Ribeirão Pires/SP	Prefeitura	2003	15	Desativada
Ciríaco/RS	Prefeitura	2003	15	Desativada
São Gonçalo/RJ	Prefeitura	2004	35	Paralisada
Jundiaí/SP	SMR	2004	20	Operando
Campinas/SP	Prefeitura	2004	70	Operando
São B. do Campo/SP	Urbem	2005	50	Operando
São B. do Campo/SP	Ecoforte	2005	70	Desativada
São José do Rio Preto/SP	Prefeitura	2005	30	Operando
São Carlos/SP	Prefeitura/Prohab	2005	20	Operando
B. Horizonte (BR040)/MG	Prefeitura	2006	40	Operando
Ponta Grossa/PR	P. Grossa Amb.	2006	20	Operando
Taboão da Serra/SP	Estação Ecologia	2006	20	Operando
João Pessoa /PB	Prefeitura/Emlur	2007	25	Operando
Caraguatatuba/SP	JC	2007	15	Operando
Colombo/PR	Soliforte	2007	40	Operando
Limeira/SP	RL Reciclagem	2007	35	Operando
Americana/SP	Cemara	2007	25	Operando
Piracicaba/SP	Autarquia/Semae	2007	20	Operando

Tabela 17 – Usinas de reciclagem do país em novembro de 2008 (continuação).

Santa Maria/RS	GR2	2007	15	Operando
Osasco/SP	Inst. Nova Agora	2007	25	Instalando
Rio das Ostras/RJ	Prefeitura	2007	20	Instalando
Brasília/DF	CAENGE	2008	30	Operando
Londrina/PR	Kurica Ambiental	2008	40	Operando
São Luís/MA	Limpel	2008	40	Operando
São J. dos Campos/SP	RCC Ambiental	2008	70	Operando
Paulínia/SP	Estre Ambiental	2008	100	Operando
Guarulhos/SP	Henfer	2008	30	Instalando
Barretos/SP	Prefeitura	2008	25	Instalando
São José dos Campos/SP	Julix - Enterpa	2008	25	Instalando
Petrolina/PE	Prefeitura	2008	25	Instalando
Itaquaquecetuba/SP	Entrec Ambiental	2008	40	Instalando

Nota: há usinas em alguns municípios do estado do RS (Canoas, Caxias do Sul, Charqueadas e São Leopoldo), porém sem maiores informações e, portanto, não contabilizadas.

Fonte: Miranda et al. (2009).

Miranda et al. (2009) contrasta os benefícios das usinas públicas com a falta de interesse em mantê-las por parte dos governantes. Em 2008, somente 15 estavam operando ou em fase de instalação. Apesar da vantagem econômica, com a redução das despesas com limpeza pública e a obtenção de agregados reciclados com valores cerca de 40% mais baratos que os naturais, os municípios possuem dificuldades em gerenciar essa atividade, por motivos como:

- a) Mudança de gestão ou desinteresse desta;
- b) Dificuldades na manutenção/operação da usina por falta de técnicos especializados;
- c) Demora na liberação de verbas para manutenção.

Embora a quantidade de usinas de beneficiamento tenha crescido no Brasil, a produção de agregados reciclados cresceu discretamente (Figura 07). Ao considerar todas as usinas em operação no ano de 2008, estima-se que 3,6% dos RCC produzidos no país estão sendo reciclados, enquanto que se nenhuma usina fosse desativada, essa taxa aumentaria para 4,5%. Dessa forma, há a necessidade de

instalar mais usinas para que a reciclagem de RCC no Brasil alcance valores expressivos (MIRANDA et al., 2009).

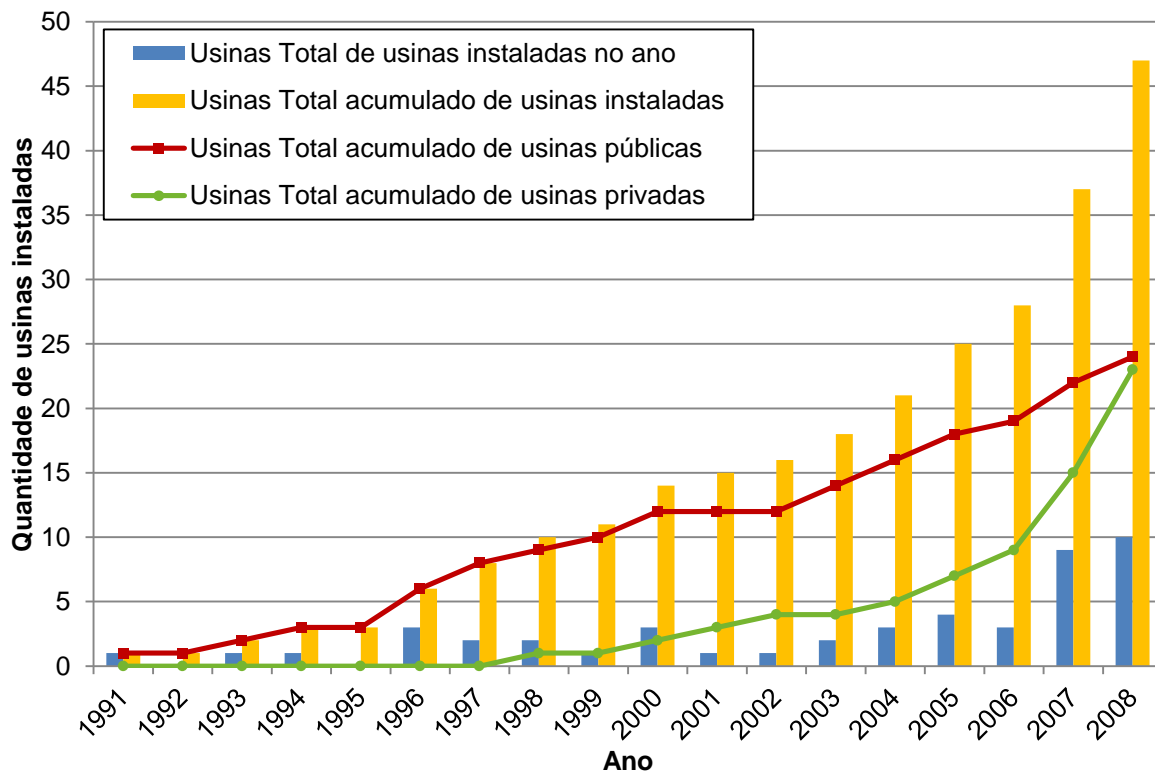


Figura 06 – Usinas de reciclagem de RCD classe A inauguradas ao longo dos anos.  
Fonte: Miranda et al. (2009).

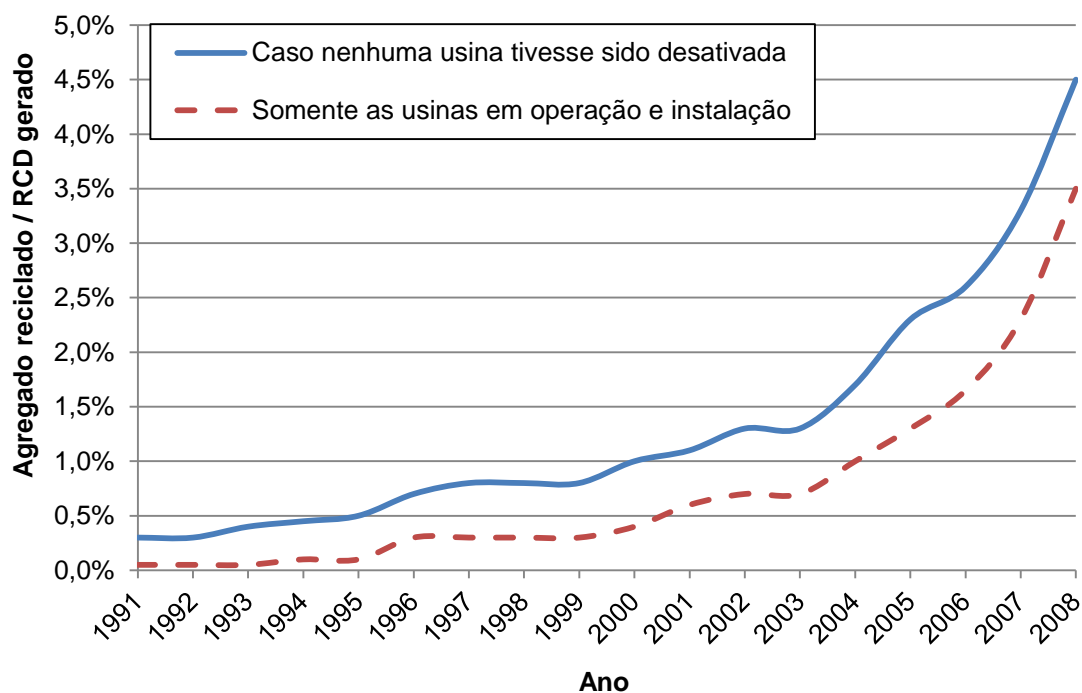


Figura 07 – Relação entre produção de agregados e RCD gerado no Brasil.  
Fonte: Miranda et al. (2009).



Segundo O'Mahony & Milligan (1991), para que uma usina de reciclagem possa apresentar viabilidade financeira, a mesma deve ser instalada em grandes cidades. Dessa forma, existirá um fluxo suficiente de resíduos, o que proporcionará uma produção constante de agregados reciclados.

Angulo & John (2004) citam que as centrais de reciclagem de RCC do Brasil possuem uma configuração organizacional simples, quando comparadas com as usinas do exterior, pois possui apenas alimentador, britador, correia transportadora e (algumas) eletroímã. Assim, os equipamentos utilizados nos processos de beneficiamento afetam as características dos RCC, tais como composição, granulometria, forma, resistência e teor de impurezas (LIMA, 1999).

Segundo Zordan (1997), as primeiras usinas de beneficiamento do Brasil – usina de Itatinga, na cidade de São Paulo, e a de Londrina - PR – tornaram-se obsoletas após poucos anos de uso e, em virtude de erros de planejamento, não tiveram os efeitos esperados. No entanto, existem casos de sucesso como o da cidade de Belo Horizonte – MG, que consistiu na instalação de quatro usinas de reciclagem próximas a locais de depósito clandestino, proporcionando a recepção de cargas de RCC seguido pela produção de agregado reciclado.

## 2.7.1 Tipos de usinas de beneficiamento

### 2.7.1.1 Plantas fixas

As usinas de plantas fixas são adotadas para locais definitivos, ou seja, pedreiras, áreas de mineração, fábricas de cimento, etc. (METSO, 2011) (Figura 08). Esse tipo de planta possibilita a obtenção de agregados de melhor qualidade, pois permite a utilização de equipamentos maiores e mais potentes, o que traz maior confiabilidade ao produto final. Além disso, possibilita maior número de fases no processo de britagem, como triagem para eliminação das impurezas e peneiramento para obtenção de agregados de diversos tamanhos. No entanto, as maiores desvantagens são os grandes investimentos aplicados e a disponibilidade de uma grande área para instalação da usina (CAIRNS et. al., 1998).



Figura 08 – Exemplo de planta de britagem fixa.  
Fonte: Bernucci et al. (2006).

#### 2.7.1.2 Plantas semimóveis

As usinas de plantas semimóveis são empregadas em empreendimentos que necessite de britagem permanente durante anos, pois possibilitam facilidade, rapidez e economia de montagem. São empregadas em obras de grande porte como, por exemplo, instalações de barragens hidrelétricas, pedreiras para instalações de estradas, construção de túneis rodoviários, entre outras (JADOVSKI, 2005) (Figura 09).

Como principais características, as plantas semimóveis são constituídas por bases de estrutura metálica, a baixa altura (facilita a montagem e manutenção e diminui o comprimento das correias transportadoras intermediárias) e a simplicidade de instalação. Como desvantagens, esse tipo de usina possui custo elevado e as estruturas construídas não são reutilizáveis (METSO, 2011).

#### 2.7.1.3 Plantas móveis

As plantas móveis são usinas deslocáveis, utilizadas em empreendimentos que necessitam mobilidade constante. São muito utilizadas porque eliminam custos como sucessivas montagens, desmontagens e transporte. São geralmente empregadas em serviços de manutenção de estradas, prospecção geológica,

exploração de jazidas espalhadas em uma determinada área, entre outros (METSO, 2011) (Figura 10).



Figura 09 – Exemplo de planta de britagem semimóvel.  
Fonte: Metso (2011).

Como benefícios, essas usinas podem ser transportadas facilmente, utilizam pouca mão de obra, necessitam pouco tempo para instalação e remoção, podem ser locadas em pequenas áreas, até mesmo junto ao depósito de material britado. Além disso, possuem vários tipos, tamanhos e sistemas de operação, o que permite melhor adequação a obra (JADOVSKI, 2005).



Figura 10 – Exemplo de britador móvel.  
Fonte: SBM (2011).

## 2.8 Classificação normativa dos resíduos

Para que sejam seguidos corretamente os processos de manejo, gerenciamento, gestão, transporte, disposição final, reciclagem e produção de agregados derivados de RCC, faz-se necessário a implantação de normas técnicas que orientem e responsabilizem os agentes envolvidos. Esses instrumentos, integrados a políticas públicas, podem auxiliar uma futura padronização na oferta de agregados reciclados, e assim possibilitar um aumento na sua utilização.

Em 2002, o CONAMA pôs em vigor a Resolução nº 307, a qual é datada de 05 de julho de 2002, sendo sua vigência a partir de 02 de janeiro de 2003, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. Na prática, o órgão criou responsabilidades para toda a cadeia envolvida: geradores, transportadores, receptores e municípios. Para efeitos de caracterização dos RCC, vale ressaltar as definições dos principais tópicos:

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

**II - Geradores:** são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos definidos nesta Resolução;

**III - Transportadores:** são as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte dos resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação;

**IV - Agregado reciclado:** é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;

**V - Gerenciamento de resíduos:** é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos;

**VI - Reutilização:** é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;

**VII - Reciclagem:** é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;

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

**IX - Aterro de resíduos da construção civil:** é a área onde serão empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil Classe "A" no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro e/ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente;

**X - Áreas de destinação de resíduos:** são áreas destinadas ao beneficiamento ou à disposição final de resíduos. (CONAMA, 2002, Res. 307. Art. 2º).

A Resolução 307 também orienta o que deve constar nos Planos Integrados de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, os quais devem ser elaborados em todos os municípios brasileiros:

**I** - as diretrizes técnicas e procedimentos para o Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e para os Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil a serem elaborados pelos grandes geradores, possibilitando o exercício das responsabilidades de todos os geradores.

**II** - o cadastramento de áreas, públicas ou privadas, aptas para recebimento, triagem e armazenamento temporário de pequenos volumes, em conformidade com o porte da área urbana municipal, possibilitando a destinação posterior dos resíduos oriundos de pequenos geradores às áreas de beneficiamento;

**III** - o estabelecimento de processos de licenciamento para as áreas de beneficiamento e de disposição final de resíduos;

**IV** - a proibição da disposição dos resíduos de construção em áreas não licenciadas;

**V** - o incentivo à reinserção dos resíduos reutilizáveis ou reciclados no ciclo produtivo;

**VI** - a definição de critérios para o cadastramento de transportadores;

**VII** - as ações de orientação, de fiscalização e de controle dos agentes envolvidos;

**VIII** - as ações educativas visando reduzir a geração de resíduos e possibilitar a sua segregação. (CONAMA, 2002, Res. 307. Art. 6º).

Com relação ao processo de reciclagem, para que os agregados reciclados possam ser reutilizados na construção civil, as usinas de beneficiamento de RCC devem somente utilizar resíduos de Classe A, livre de contaminantes de outras classes. As relações das classes e dos materiais que as compõe estão dispostas na Tabela 18.

Após a publicação de pesquisas que demonstraram a viabilidade na reutilização de RCC, e também da publicação das resoluções do CONAMA, a ABNT

publicou normas que regulamentam desde os projetos para implantação de áreas de aterro de RCC, até suas utilizações após o beneficiamento, as quais estão descritas pelas normas:

- **NBR 15112 (ABNT, 2004):** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- **NBR 15113 (ABNT, 2004):** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- **NBR 15114 (ABNT, 2004):** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- **NBR 15115 (ABNT, 2004):** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- **NBR 15116 (ABNT, 2004):** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Tabela 18 – Classificação dos RCC segundo as Resoluções 307, 348 e 431 do CONAMA.

Classificação	Tipologia
<b>Classe A</b>	São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto ( blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras;
<b>Classe B</b>	São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
<b>Classe C</b>	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;
<b>Classe D</b>	São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Fonte: Resolução 307, 348 e 431 do CONAMA.

Vale ressaltar que ao utilizar agregados reciclados em pavimentação, deve-se atentar para os limites impostos pela NBR 15116 (ABNT, 2004), os quais destacam-se os requisitos apresentados nas Tabelas 19 e 20, que estabelecem critérios sobre a classe de material que pode ser utilizada, teor de finos e impurezas, valores mínimos de CBR, expansibilidade máxima das camadas, entre outros.

Tabela 19 – Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação

Propriedades	Agregado reciclado classe A		Normas de ensaios	
	Graúdo	Miúdo	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
<b>Composição granulométrica</b>	Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		ABNT NBR 7181	
<b>Dimensão máxima característica</b>	$\leq 63$ mm		ABNT NBR NM 248	
<b>Índice de forma</b>	$\leq 3$	-	ABNT NBR 7809	-
<b>Teor de material passante na peneira de 0,42 mm</b>	entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181	
<b>Contaminantes - Teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)</b>	Materiais não minerais de mesmas características <sup>1</sup>		2	Anexo A Anexo B
	Materiais não minerais de características distintas <sup>1</sup>		3	Anexo A Anexo B
	Sulfatos		2	ABNT NBR 9917

<sup>1)</sup> Para efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.  
Fonte: NBR 15116 (ABNT, 2004).

Tabela 20 – Requisitos específicos para agregados reciclados destinados à pavimentação.

Aplicação	ISC (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	$\geq 12$	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	$\geq 20$	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento <sup>1</sup>	$\geq 60$	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada

<sup>1)</sup> Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com  $N \leq 10^6$  repetições do eixo padrão de 8,2tf (80kN) no período de projeto.  
Fonte: NBR 15116 (ABNT, 2004).

Algumas usinas utilizam a pré-seleção dos resíduos como parte do processo de beneficiamento, que difere a aplicação dos agregados reciclados nos diversos ramos da construção civil é a sua composição. Assim, de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004), os RCC são classificados da seguinte maneira:

**Agregado de resíduo de concreto (ARC):** É o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

**Agregado de resíduo misto (ARM):** É o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. (ABNT, 2004, NBR 15116, p. 3).

Os RCC são alvo de discórdia devido às classificações da NBR 10004 (ABNT, 2004), que seleciona os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Desta forma, os resíduos sólidos classificam-se em três categorias:

- a) Resíduos Classe I – perigosos: são aqueles que apresentam periculosidade ou características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- b) Resíduos Classe II A – não-inertes: são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou resíduos classe II B, podendo ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- c) Resíduos Classe II B – inertes: são aqueles que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Em conformidade com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os RCC podem ser classificados como inertes, e são pertencentes à Classe II B, pois não apresentam concentrações maiores que os padrões aceitáveis de potabilidade quando submetido a ensaios de solubilização. Porém, constituintes como o gesso, óleos, resinas, solventes e tintas, são considerados resíduos perigosos (Classe I). Portanto, é prudente a separação prévia desses resíduos, para que possam ser



dados tratamento e destinação adequados, e assim não contamine os demais (ZORDAN, 2003).

Peng et al. (1997) e Oliveira et al. (2001) discordam dessa classificação, pois os aterros de RCC podem sofrer problemas de lixiviação e contaminar o lençol freático. Outro aspecto ressaltado refere-se ao concreto, pois podem contaminar o solo e as águas do subsolo se sofrer lixiviação, o que não o faz um material inerte. Dessa maneira, os autores citam a reciclagem como forma eficaz de prevenir esses impactos ambientais, além disso, sugerem que os RCC sejam classificados como Classe II A.

Recentemente, com a publicação da Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), ocasionou-se uma mudança de paradigmas com relação ao gerenciamento dos RCC. A PNRS unificou algumas normas, instrumentos e diretrizes para a gestão de resíduos e foi um progresso para a sustentabilidade no Brasil. Com o decreto nº 7.404, a lei foi regulamentada e imediatamente os setores da economia devem se adaptar e aplicar corretamente as novas regras para coleta seletiva e restituição dos resíduos para reaproveitamento ou outra destinação adequada ao meio ambiente.

## **2.9 Impactos ambientais causados pelos resíduos**

O setor da construção civil é responsável por aproximadamente um quinto do PIB nacional, sendo que a sua cadeia produtiva necessita de matéria prima em abundância para alimentar esse processo. No entanto, verifica-se que os estoques estão limitados, o que demanda um correto planejamento para que não se produza impactos negativos ao meio ambiente (JADOVSKI, 2005). Segundo a Resolução 01 do CONAMA, impacto ambiental é definido como:

“Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetem a saúde, a segurança e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos naturais”. (CONAMA, 1986, Res. 01, Art. 1º).

Peng et al. (1997) relacionou os impactos ambientais causados com a disposição dos RCC no solo e, a partir disso, construiu um modelo hierárquico para avaliá-los. A redução na geração de RCC é considerada a melhor alternativa, pois condiciona todas as outras. Por isso deve ser aplicada a programas de qualidade e produtividade nas empresas, já que influencia diretamente nos aspectos econômicos. Logo abaixo se encontram as ações de reciclagem e reutilização de RCC. No outro extremo, encontram-se processos de compostagem e incineração para alguns produtos específicos, seguidos pelo aterramento, que seria a alternativa de maior impacto ambiental.

Pinto (2005) cita que a falta de políticas públicas que regulamentem e disciplinem o gerenciamento dos RCC são responsáveis por grande parte das degradações ao meio ambiente. Além disso, a adoção dessas políticas pode orientar o manejo e ordenar os fluxos de destinação dos resíduos. Assim, tem-se a diminuição de impactos ambientais, tais como:

- Degradação das áreas de manancial e de proteção permanente;
- Proliferação de agentes transmissores de doenças;
- Assoreamento de rios e córregos;
- Obstrução dos sistemas de drenagem, tais como, galerias, sarjetas, etc;
- Ocupação de vias e logradouros públicos por resíduos, com prejuízo à circulação de pessoas e veículos, além da própria degradação da paisagem urbana;
- Existência e acúmulo de resíduos que podem gerar risco por sua periculosidade ou toxicidade.

Sistemas de qualificação como o Programa Brasileiro da Produtividade e Qualidade do Habitat (PBPQ-H) auxiliam na prevenção de danos ambientais, pois para que uma construtora seja qualificada no mais alto nível, esta deve observar e atender a requisitos que são condicionados a diminuição da geração de RCC nos canteiros, bem como destinação e disposição correta dos mesmos. A falta de observância de algum desses requisitos poderá resultar na restrição ao crédito oferecido pelas instituições financeiras que exigem tal qualificação como critério de seleção para seus tomadores de recursos (PINTO, 2005).

Os RCC são constituídos, na sua grande maioria, por materiais pesados e volumosos que, se forem depositados em locais irregulares, se tornam focos para deposição de outros tipos de resíduos, geralmente RSU. Como a deposição é efetuada sem tratamento, a estocagem pode gerar contaminações pela hidratação das escórias, lixiviação ou solubilização de algumas substâncias nocivas presentes na composição que, ao percolarem o solo, contamina-o (JOHN & ROCHA, 2003; OLIVEIRA, 2003).

Segundo Degani (2003), para que a indústria da construção civil desenvolva-se de modo sustentável, esta deve adotar novos critérios para seleção de materiais a serem empregados nas obras, pois grande parte dos agravos ambientais é causada por materiais de baixa eficiência, que geram perdas ao processo construtivo.

Os RCC, além de poluir o solo, são considerados uma ameaça à saúde pública, pois se forem dispostos de forma irregular, sem proteção, podem atrair outros resíduos não inertes (Figura 11). Assim, frequentemente são encontrados restos de comida, móveis velhos, restos de plantas, entre outros RSU, que oferecem um ambiente propício para a proliferação de vetores patogênicos, tais como: insetos, ratos, bactérias e fungos (JOHN & ROCHA, 2003; SCHNEIDER, 2003).

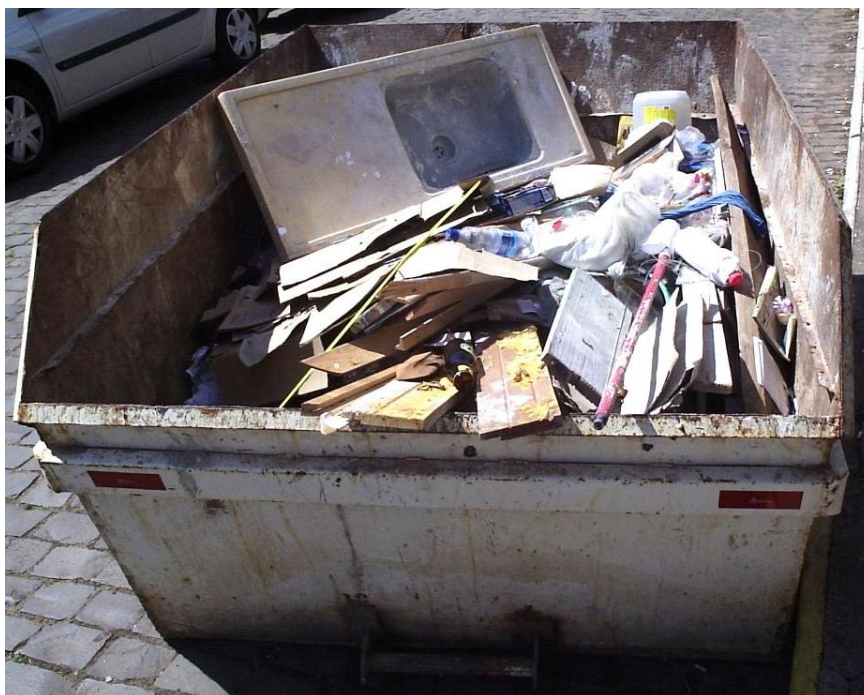


Figura 11 – Flagrante de disposição de resíduos não inertes em caçamba coletora de RCC.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

Souza et al. (2004) ressalta que a escassez de locais de disposição é apontado como um dos aspectos que mais influenciam nas degradações ambientais. Do mesmo modo, Angulo (2000) descreve que o nível de degradação que um material ocasiona ao meio ambiente está relacionado com o ciclo de vida do mesmo, ou seja, o tempo que leva para degradar-se e quais as implicações que esse processo propicia.

Por apresentarem tempo de decomposição muito elevado, os RCC sobrecarregam os locais onde são depositados em um curto espaço de tempo. Por isso faz-se necessário a adoção de programas de gerenciamento que conduzam ao reaproveitamento dos mesmos. Nesse enfoque, é comum encontrar projetos de gerenciamento que utilizem a prática dos “4Rs” (reduzir, reciclar, reutilizar e reintegrar). Tais projetos visam à redução do desperdício de materiais nas obras, reutilizam os RCC que podem ser alocados em outros processos, e por fim, os demais resíduos são enviados a usinas de reciclagem, para que possam ser reintegrados como agregado para construção ou como material para outros fins (KUNKEL, 2009).

No entanto, programas de educação ambiental, adotados em algumas universidades, estão objetivando aos futuros profissionais a redução de danos causados por diversos tipos de resíduos. Essa metodologia é conhecida como os “5Rs”. Além de reduzir a geração, reciclar e reutilizar os RCC, esse método tem como objetivo sugerir ao construtor (ou consumidor) que repense as técnicas que irá aplicar na obra e, dessa forma, recuse materiais que possuam potencial agressividade ao meio ambiente (LAMS, 2011).

Segundo levantamentos da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2010), quase a totalidade das empresas registra indicativos de RCC misturados com os RSU, o que prejudica substancialmente o tratamento pós-consumo. Do mesmo modo, a contaminação afeta as características intrínsecas dos resíduos, o que afeta a viabilidade do seu aproveitamento, assim como se torna um obstáculo no desenvolvimento das pesquisas que visam sua reciclagem (JOHN & ROCHA, 2003; VON STEIN, 2000).

## 2.10 Aspectos econômicos dos resíduos

Angulo et al. (2003) citam que para serem descartados de forma legal, os RCC apresentam elevado custo de operação ao gerador. Esses custos compreendem a coleta, transporte até aterro ou usina de reciclagem e pagamento das taxas de entrada nos locais de deposição. Por analogia, John (2000) cita que as vantagens econômicas são baseadas no processo de reciclagem dos RCC, pois possibilita a preservação dos recursos naturais com a redução da degradação da destruição da paisagem, e também a redução na extração de matéria prima. Assim, a reciclagem pode transformar uma fonte de despesa em uma fonte de faturamento, pois reduz os custos com o tratamento de resíduos e propicia novas oportunidades de negócios.

Gastar acima do orçamento inicial previsto na construção é praticamente um vício no Brasil. Desperdiçar material é outra constante. Os materiais que mais apresentam perdas na construção civil, segundo estudos do NORIE - UFRGS, são os derivados de aço, cimento, concreto, areia, argamassa, tijolos vazados e maciços. Tais materiais representam cerca de 20% do custo total da obra, e a quantidade desperdiçada pode alcançar até 12% do valor pago pelos mesmos. (BERNARDES, 2006).

Segundo dados do IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), no Brasil, cerca de R\$ 8 bilhões são perdidos anualmente por não se reciclar o que é descartado no país. Desse montante, as obras do setor da construção civil contribuem com 61% dos resíduos sólidos gerados no país, correspondendo a 90 milhões de toneladas de lixo por ano. Outro grande problema enfrentado pelas municipalidades é que volume de entulho das atividades de construção e demolição é duas vezes maior do que o volume de lixo sólido urbano na maioria das cidades (JACQUES, 2011).

Kazmierczak (2008) explica que os RCC devem ser entendidos como uma oportunidade de negócios, pois a sua reciclagem pode ser utilizada como instrumento de marketing pelas empresas e, dessa forma, trazer benefícios financeiros. Após a moagem, os resíduos podem ser utilizados em peças de concreto, argamassas e em pavimentação. A cidade de Belo Horizonte contempla um dos principais exemplos de reciclagem, a utilização dos agregados reciclados

para execução de bases de pavimentos trouxe uma economia de 20% em relação ao agregado tradicional.

Outra vantagem econômica, que também é válida como ferramenta de marketing, é a obtenção dos chamados “selos verdes”. Esses selos servem para atestar a qualidade de uma obra perante passivos ambientais, dessa forma, organizações estão avaliando a eficiência das edificações e os impactos que as mesmas causaram durante a construção. Dessa forma, para obtenção desses selos é necessário preencher alguns requisitos como:

- Espaço sustentável (acessibilidade interna e externa);
- Redução de impactos ambientais;
- Utilização de materiais regionais;
- Utilização de materiais que propiciam o desmonte e posterior reutilização;
- Uso racional da água;
- Redução do consumo de energia;
- Redução do desperdício.

É possível notar que a maioria desses quesitos pode ser alcançada com a execução de um bom programa de gerenciamento de RCC, que visem à utilização de materiais não poluentes que, em outro estágio, possam ser recicláveis. Além disso, a redução na geração de RCC é tratada como principal ponto a ser avaliado, pois reflete a ineficiência dos demais (SCHNEIDER, 2003; GIORGINO, 2008).

Segundo Kazmierczak (2008), com mudança de gestão e instalação de indústria recicladora, a cidade de Belo Horizonte proporcionou uma redução de custos com remoção de RCC de locais irregulares, que girava em torno de um milhão de dólares anuais. Já Brito Filho (1999 apud JOHN, 2000) relata que a prefeitura de São Paulo recolhe cerca de 4 mil toneladas de RCC por mês ao custo mensal de 4,5 milhões de reais, estimando-se um gasto com remoção de mais de 50 milhões de reais por ano. No seu estudo, o autor ainda cita que os custos com recolhimento podem variar de 5,4 a 14,8 dólares por tonelada.

Kazmierczak (2008) também ressalta que as vantagens econômicas só serão alcançadas se forem tecnicamente viáveis e não contaminem o meio ambiente. A partir disso, deve ser procedido um estudo tecnológico que comprove as propriedades do material no qual os agregados reciclados serão incorporados. Tal

garantia é necessária porque o a construção civil se diferencia dos demais setores industriais em aspectos que não colaboram para melhorar a qualidade das obras, Costa (2003) relata alguns deles:

- a) Produtos únicos e não seriados;
- b) Uso de elevado número de insumos, materiais e componentes;
- c) Alta contratação e mão de obra não qualificada;
- d) Em sua maioria, e composta de pequenas empresas;
- e) Alta rotatividade de mão de obra;
- f) Condições de trabalho precárias;
- g) Grande número de acidentes de trabalho e de doenças ocupacionais;
- h) E um setor muito tradicional, com grande inercia nas alterações;
- i) O grau de precisão com que trabalha este setor e em geral muito menor do que em outras indústrias, qualquer que seja o parâmetro que se contemple (orçamento, prazo ou resistência mecânica);
- j) As responsabilidades são dispersas e pouco definidas.

Para que surjam (e se mantenham) usinas de reciclagem privadas é necessária a exploração de novos nichos de mercado. Segundo dados de Pinto (1999), o consumo de agregados reciclados pelas prefeituras gira em torno de 45% da massa total, e é utilizado quase que em sua totalidade para pavimentação. Porém, obras de pavimentação dependem de vários aspectos para serem executadas, assim não proporcionam uma saída contínua que atenda a produção de agregado reciclado. Por isso, a abertura de novos mercados é condição essencial para que se diminuam os riscos para implantação de negócios privados nessa área (ANGULO & JOHN, 2002).

Pode-se verificar que, a medida que novas tecnologias surgem, a utilização dos RCC acende, e isso resulta na consolidação de um novo produto no comércio. Tal fato procede com a maioria dos materiais, a literatura mostra que os materiais apresentam um baixo grau de valorização inicial, mas com o desenvolvimento de novas aplicações esse panorama tende a melhorar. Esse fenômeno aconteceu, por exemplo, com as cinzas volantes (Figura 12). A valorização se dava ao passo que novas aplicações eram descobertas, em um primeiro momento o gerador pagava para que consumidores retirassem as cinzas Atualmente, sabe-se que elas

melhoram as propriedades do concreto, e por isso o produto é vendido para usinas desse ramo (JOHN & ANGULO, 2003; SANTOS, 2007).

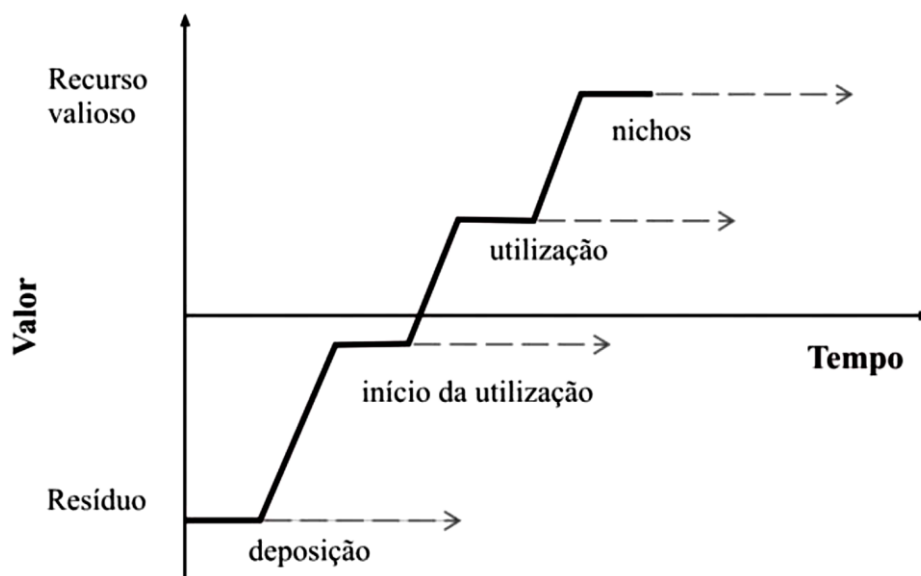


Figura 12 – Evolução do valor das cinzas volantes conforme o desenvolvimento de novas aplicações.  
Fonte: Santos (2007)

A deposição dos RCC gerados na união europeia que não são reciclados representa um volume de 130 milhões de m<sup>3</sup> por ano, o que equivale a uma área com 13Km<sup>2</sup> e 10m de altura. Por outro lado, o mercado alemão contribui para diminuir esses índices, através de uma eficiente e crescente indústria de materiais reciclados, o faturamento desse setor chegou a 4940 milhões de euros em 2004, o que aumentou as vagas de emprego nesse segmento de 13.357 para 17.000 empregos entre 2000 e 2004 (WEISLEDER & NASSERI, 2006).

Um bom exemplo dos benefícios econômicos associados à reciclagem dos RCC é ilustrado pela Agência Ambiental de os EUA (EPA 2002), onde afirma que a incineração de 10 mil toneladas de resíduos pode significar a criação de um trabalho, o aterro pode criar seis postos de trabalho, mas se a mesma quantidade de resíduos é reciclada, o processo pode criar 36 postos de trabalho (TORGAL & JALALI, 2011).

Atualmente, são grandes as discussões acerca do valor de venda dos RCC beneficiados, embora os agregados reciclados custem de 15% a 30% menos que o material proveniente de uma pedra, os mesmos não se tornam viáveis se utilizados em pequenas proporções. A utilização dos agregados reciclados seria impulsionada caso houvesse incentivo fiscal, empresários do ramo de reciclagem de



resíduos relatam que pagam o mesmo imposto que um produto proveniente de uma pedreira, porém deve-se observar que os resíduos que serão utilizados nas usinas de beneficiamento já tiveram seu imposto coletado no momento da venda pós-fabricação (CORSINI, 2011).

O reaproveitamento de agregados reciclados em pavimentação apresenta aspectos técnicos e econômicos que, juntamente com a diminuição dos passivos ambientais, podem impulsionar o as indústrias de reciclagem e, por conseguinte, o uso desse material. Pesquisas consolidadas demonstram que a utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos proporcionam benefícios como (CARNEIRO et al., 2001; TRICHÊS & KRUCKYJ, 1999 apud FERNANDES, 2004):

- a) Utilização de quantidade significativa de material reciclado tanto na fração miúda quanto na graúda;
- b) Simplicidade dos processos de execução do pavimento e de produção do agregado reciclado;
- c) Possibilidade de utilização dos diversos materiais componentes do entulho (concretos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.);
- d) Utilização de parte do material em granulometrias graúdas;
- e) Utilização em locais com presença de água, por ser considerado material não plástico e com baixa ou nula expansibilidade.
- f) Redução dos custos da administração pública Municipal com a remoção do material depositado clandestinamente ao longo das vias públicas, terrenos baldios, cursos d'água e encostas;
- g) Aumento da vida útil dos aterros sanitários, reduzindo a necessidade de áreas para implantação de novos aterros;
- h) Diminuição nos custos de pavimentação.

## **2.11 Propriedades dos resíduos**

Como abordado na seção 5.4, por serem constituídos de diversos tipos de materiais, os RCC apresentam como principal característica a composição heterogênea. Tal característica transforma o agregado reciclado em um material de comportamento instável, pois à medida que sua composição for alterada, o mesmo

ocorrerá nas propriedades do conjunto, como a resistência, absorção, teor de impurezas, etc. Dessa forma, quando pretende-se utilizar agregados reciclados, é necessário um minucioso estudo de caracterização para determinar as suas limitações e, a partir disso, avaliar se o mesmo atende a finalidade proposta (ANGULO, 2000).

Sob o mesmo enfoque, Lima (1999) ressalta que as propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados também são afetadas pelos equipamentos utilizados no processo de britagem, por exemplo, a decomposição de concretos em frações menores pode diminuir significativamente a resistência desse constituinte no conjunto. No entanto, procedimentos simples podem ser adotados nas usinas de beneficiamento para aumentar a homogeneização dos agregados reciclados, tais como: misturar as partidas de diferentes tipos de resíduos no momento da entrega, alternar os resíduos de tipos diferentes ao alimentar o núcleo de reciclagem e retirar material de diversas camadas das pilhas no momento da expedição.

Diferentemente dos agregados naturais, os agregados reciclados apresentam alta absorção devido a grande porosidade e a maior presença de finos. Agregados reciclados de alvenaria e argamassa apresentam taxas de absorção de aproximadamente 15%, enquanto que os agregados derivados de concreto atingem em média 10%, já agregados mistos possuem taxas que oscilam entre esses índices. Assim, a absorção de água dos agregados reciclados é diretamente proporcional à quantidade de materiais cerâmicos e decresce linearmente com o aumento de teores de concreto e rochas (ZORDAN, 2003; BARRA, 1996; LIMA, 1999; LEITE, 2001; ANGULO, 2000).

Quando pretende-se empregar agregados reciclados em componentes ou obras que necessitem alta resistência mecânica, é conveniente examinar o teor de argamassa aderida ao agregado reciclado, pois a argamassa pode prejudicar a resistência, possui maior absorção e menor densidade. Além disso, o teor de argamassa pode prejudicar a durabilidade dos agregados reciclados, principalmente em derivados de argamassa e concretos. De acordo com a bibliografia consultada, o teor de argamassa é maior nas frações mais finas do que nas graúdas, o que implica a absorção alta de agregados derivados de cimento. Os quais variam entre 8% e 12% para agregados miúdos e entre 4% e 8% para agregados graúdos. Já os derivados de material cerâmico apresentam índices de absorção entre 9% e 15%

para blocos, e entre 14% e 25% para tijolos (HANSEN, 1992; LIMA, 1999; LEITE, 2001).

Outro aspecto importante que influencia nas características dos agregados reciclados é a distribuição granulométrica após a britagem. A granulometria pode influenciar em propriedades como: trabalhabilidade, resistência mecânica, consumo de aglomerantes, absorção de água, permeabilidade, fluência, retração por secagem e módulo de elasticidade. Por essa ampla abrangência, a distribuição granulométrica é considerada um dos parâmetros principais para dosagem de misturas, porém o controle desses parâmetros pode-se iniciar no processo de produção, ajustando-se o diâmetro máximo dos agregados ou peneirando os mesmos. Assim, pode-se obter curvas granulométricas similares as utilizadas comercialmente para agregados naturais, o que aumentará o custo da reciclagem (BARRA, 1996; LIMA, 1999).

Schulz & Hendricks (1992 apud JADOVSKI, 2005) ressaltam que mesmo as centrais de reciclagem mais modernas encontram dificuldades para obter agregados reciclados de alvenaria que atendam às exigências de granulometria de agregados naturais. Latterza & Machado Jr. (1997 apud JADOVSKI, 2005) relatam que ao utilizar um britador de impacto para quebra das frações maiores dos RCC, a geração de material fino pode atingir grandes porcentagens, como resultado das pesquisas, os autores encontraram em torno de 48% de partículas compreendidas na fração miúda, ou seja, passante na peneira 4,8mm. Como processo para redução da quantidade, Van der Wegen & Haverkort (1998, apud JADOVSKI, 2005) indicam que a lavagem dos agregados reduziu o teor de materiais finos (<0,063 mm) de 10% nos agregados não lavados para 0,8% nos agregados lavados.

A forma e a textura dos agregados reciclados são de fundamental importância para a mistura dos mesmos entre si e com outros materiais. No entanto, essas características dependem de fatores como o tipo de RCC processados e dos equipamentos utilizados no processo de britagem. Geralmente a fração graúda dos agregados reciclados possui um coeficiente de forma idêntico ao agregado obtido por algumas rochas calcárias, que apresenta forma irregular, textura superficial áspera e porosa. De modo geral, a textura dos agregados naturais é caracterizada pela superfície polida, os agregados reciclados de derivados de cerâmica apresentam superfície levemente áspera e os derivados de concreto apresentam superfície muito áspera (CARNEIRO et al., 2001; JADOVSKI, 2005).

Na produção de concretos, superfícies mais rugosas, maior angulosidade e maior área específica dos agregados reciclados contribuem para a melhoria da aderência pasta/agregado. Além disso, quanto maior a quantidade de poros no agregado reciclado, maior absorção de água ocorrerá, aumentando, por exemplo, a umidade ótima necessária para compactação. Porém, isso pode ser prejudicial quando ocorre a contaminação com sais, se os mesmos se alojam nos poros podem acelerar a deterioração do agregado reciclado e prejudicar sua reutilização (HANSEN, 1992; LEITE, 2001).

Com relação à massa específica, os agregados reciclados apresentam valores entre 5% e 10% menores do que os agregados naturais, e podem apresentar variações que dependem da origem e granulometria do material. Além disso, o método de ensaio também influencia na determinação dessas propriedades devido à alta porosidade, elevada absorção e fragilidade das partículas, que podem implicar resultados um pouco dispersivos (HANSEN, 1992; LEITE, 2001).

Os agregados reciclados de concreto possuem massa específica maior que os agregados de alvenaria, isso acontece porque a constituição dos agregados provenientes de concreto é mais homogênea que os agregados reciclados mistos. Com relação ao tamanho das partículas, as frações graúdas dos agregados de concreto possuem menores variações que os agregados convencionalmente utilizados, que é propiciado pelo menor teor de argamassa aderido a essas parcelas. Assim, as frações mais finas apresentam menor massa específica devido a maior quantidade de argamassa original presente nessas frações (LIMA, 1999).

Os valores de massa específica e unitária apresentam-se dispersos na literatura existente. Para os agregados reciclados de concreto, os valores variam entre 1,97 kg/dm<sup>3</sup> e 2,59 kg/dm<sup>3</sup> para agregados miúdos e entre 2,12kg/dm<sup>3</sup> e 2,43kg/dm<sup>3</sup> para agregados graúdos. Já para agregados reciclados cerâmicos, a massa específica situa-se entre 1,87kg/dm<sup>3</sup> e 2,55kg/dm<sup>3</sup>. Considerando-se massa específica na condição de superfície seca, os agregados reciclados de concreto situam-se entre 2,19 kg/dm<sup>3</sup> e 2,32 kg/dm<sup>3</sup> para agregados miúdos e entre 2,29kg/dm<sup>3</sup> e 2,51kg/dm<sup>3</sup> para agregados graúdos. Com relação à massa unitária, os agregados reciclados de concreto apresentam valores entre 1,07kg/dm<sup>3</sup> e 1,56kg/dm<sup>3</sup> e os agregados reciclados cerâmicos entre 1,09kg/dm<sup>3</sup> e 1,41kg/dm<sup>3</sup> (HANSEN, 1992; BARRA, 1996; ZORDAN, 1997; BAZUCO, 1999; MANSUR et al.,

1999; CARNEIRO et al., 2001; LEITE, 2001; LATTERZA & MACHADO, 1997 apud JADOVSKI, 2005).

Com relação à abrasão, os agregados reciclados apresentam maior desgaste que os agregados naturais. A argamassa é o constituinte que mais se deteriora devido a sua fraca ligação com as partículas de agregado. Zordan & Paulon (1998) relatam que a resistência ao desgaste por abrasão para os concretos com agregados reciclados são aproximadamente 25% superiores aos obtidos pelos concretos convencionais. Os agregados naturais apresentam perda por abrasão entre 19% e 25% em peso, enquanto que os agregados reciclados apresentam índices variando entre 20% e 44% (HANSEN, 1992; BAZUCO, 1999; TAVAKOLI & SOROUSHIAN, 1996 apud JADOVSKI, 2005).

A presença de matéria orgânica e solos argilosos podem reduzir a resistência mecânica de misturas perante ensaios de compressão simples. Outra reação da presença desses materiais é a instabilidade dimensional quando expostos a ciclos de gelo e degelo ou umedecimento e secagem, porém esse tipo de contaminação atinge tanto materiais naturais como reciclados (HANSEN, 1992).

É necessário observar a presença de matéria orgânica misturada aos agregados reciclados, pois essa é extremamente leve e afeta nas ligações entre os agregados e na relação pasta/agregado. A presença de matéria orgânica pode ocasionar o aumento do tempo de início da pega em pastas e a diminuição da sua resistência, devido à presença de bolhas de ar internas na mistura. Além disso, a presença de material betuminoso também pode reduzir substancialmente a resistência do material à compressão simples, por exemplo, a adição de 30% em volume de asfalto no agregado reciclado reduz a resistência à compressão em cerca de 30% (LEITE, 2001; HANSEN, 1992).

Outros componentes misturados aos agregados reciclados também podem ser considerados contaminantes, como é o caso do gesso e dos cloretos. O gesso possui ação expansiva na presença de água, o que provoca o aumento das tensões no componente onde está inserido. No caso dos cloretos, esses podem causar ou acelerar o desgaste químico das partículas, geralmente o agregado contaminado por cloretos é proveniente de zonas marinhas, pavimentos submetidos a saís de degelo ou de aditivos aceleradores de pega a base de cloretos misturados aos resíduos (LIMA, 1999; LEITE, 2001; HANSEN, 1992).

Na Holanda, o agregado mais utilizado em bases granulares é o resíduo de demolição da construção civil. A mistura é constituída de concreto e alvenaria britados de forma a serem enquadrados nas especificações granulométricas holandesas. Niekerk et al. (2000) realizaram ensaios triaxiais convencionais nesses agregados utilizando corpos de prova de 30x60 cm compactados nos teores de umidades de 6, 8, 10 e 12%, o que resultou em graus de compactação de 97, 100, 103 e 105%, respectivamente para cada teor de umidade. Foi avaliada a curva média da faixa granulométrica especificada pelas normas holandesas. Os ensaios foram realizados segundo a modalidade de deformações controladas a uma velocidade de deformação axial de 0,167%/s. Os valores de  $\sigma_{1,f}$  foram obtidos em multiestágios de carga, ou seja, após o corpo de prova mobilizar o máximo de resistência ao cisalhamento (para a pressão de confinamento utilizada), um incremento de pressão confinante era imposto ao sistema, aumentando a resistência ao cisalhamento do corpo de prova e dando-se prosseguimento ao ensaio. A sequência de pressões confinantes utilizada foi 12, 36 e 72KPa, obtendo-se coesões efetivas de 55, 98, 89 e 142KPa e ângulos de atrito interno de 37, 40, 43 e 44°, para a curva média da faixa especificada nos graus de compactação e nos teores de umidade citados.

A Tabela 21 apresenta resultados de ensaios de compactação retirados de pesquisas relacionadas à utilização de agregados reciclados de diferentes tipos. De modo geral, os resultados apontaram que os agregados reciclados necessitam de altos teores de umidade para que se atinja o máximo peso específico aparente seco. A variação dos resultados é explicada pela composição heterogênea dos resíduos, nota-se que os agregados mistos caracterizam-se por possuírem peso específico mais baixo e umidade ótima mais alta que os agregados de concreto. Outra observação refere-se à troca de energia de compactação, conforme se aumenta a energia, ocorre a diminuição da umidade ótima e a elevação do peso específico aparente seco.

Da mesma maneira, a Tabela 22 apresenta alguns resultados de Índice de Suporte Califórnia de misturas compostas com agregados reciclados de concreto, de cerâmica ou mista, provenientes de ensaios de laboratório ou retirados de pistas experimentais. Assim como nos ensaios de compactação, os resultados oscilam conforme o local de ensaio, isso ressalta a afirmação de que a composição do agregado reciclado implica valores de ISC conforme os materiais que a constituem.

No entanto, considerando amostras provenientes do mesmo local, as compostas por derivados de cimento possuem ISC maior que as de cerâmica, e as mistas possuem valores intermediários a esses. A respeito dos ensaios efetuados em pistas experimentais, Reid (2000) ressalta que o desempenho em campo chegou a ser melhor do que o previsto em laboratório, com valores de ISC que chegaram a 245%.

Tabela 21 – Valores de peso específico seco máximo e umidade de compactação encontrados para agregados reciclados.

Composição do agregado reciclado	Procedência	Energia de compactação	Peso específico aparente seco (KN/m <sup>3</sup> )	Umidade Ótima (%)	Autor
Vermelho	Santa Catarina	Normal	12	16,6	Trichês e Kryckyj (1999)
Branco			13	17,5	
Concreto	Suécia	Modificada	20	9,4	Arm (2000)
Concreto	Estados Unidos	Normal	19,8	7,5	Bennert et al. (2000)
Concreto	Austrália	Modificada	19,6	9,5	Nataatmadja e Tan (2001)
Concreto	Coréia do Sul	Normal	18,8	12,1	Lim et al. (2001)
Branco			17,6	18,2	
Vermelho	Goiás	Intermediária	14,2	26	Ribeiro et al. (2002)
50% Vermelho e 50% Branco			23,1	15,8	
Misto	Rio de Janeiro	Modificada	18,5	12,5	Fernandes (2004)
	Minas Gerais	Intermediária	18,3	13,8	
17			17,6		
Concreto	15,2	18,2			
Misto	São Paulo	Intermediária	18,3	11	Motta (2005)
Misto	Minas Gerais	Intermediária	19,8	9,3	Moreira et al. (2006)
		Modificada	20,5	9,1	
Misto	São Paulo	Intermediária	17,6	14,6	Leite (2007)
		Modificada	18,2	13,5	

Motta (2005) realizou ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de resistência à compressão simples em corpos de prova de agregado reciclado *in natura*, com adição de 4% de cal e com adição de 4% de cimento Portland, cada qual com tempo de cura específico que compreendeu 0, 28, 90 e 180 dias para o agregado *in natura* e 7, 28, 90 e 180 dias para os demais. O agregado *in natura* praticamente não apresentou ganhos de resistência com o aumento do tempo de cura, a resistência à tração por compressão diametral manteve-se em 0,01MPa e a resistência à compressão simples em 0,40MPa. Já os corpos de prova com adição

de cal e cimento tiveram resultados mais expressivos que os de agregados reciclados in natura. A resistência à tração por compressão diametral obtida aos 180 dias de cura foi de 0,20MPa e 0,41MPa, para os corpos de prova com adição de cal e cimento, respectivamente. Com relação à resistência à compressão simples, verificou-se que aos 180 dias de cura os corpos-de-prova com adição de cal e cimento apresentaram resistências de 3,22MPa e 4,00MPa, respectivamente.

Tabela 22 – Valores de Índice de Suporte Califórnia encontrados para agregados reciclados

Composição do agregado reciclado	Procedência	Energia de compactação	Umidade Ótima (%)	ISC (%)	Autor
Vermelho	Santa Catarina	Normal	13	24	Trichês e Kryckyj (1999)
Branco			12	26	
Misto	Reino Unido	n.e.	Natural	66*	Reid (2000)
Concreto	Dinamarca	n.e.	Natural	120*	
Concreto	Suécia	n.e.	Natural	245*	
Concreto	Coréia do Sul	Normal	12,1	88	Lim et al. (2001)
Branco			18,2	62	
Vermelho	Goiás	Intermediária	26	42	Ribeiro et al. (2002)
50% Vermelho e 50% Branco			23,1	52	
Misto	Goiás	Intermediária	14,5	88	Mendes et al. (2004)
Misto	São Paulo	Intermediária	11	75	Motta (2005)
Concreto	China	Normal	11,8	66	Poon e Chan (2006)
Misto	São Paulo	Intermediária	14,6	73	Leite (2007)
		Modificada	13,5	117	

n.e.: Não especificado.

\* Valores de campo obtidos por meio de FWD (*Falling Weight Deflectometer*).

## 2.12 Aplicações dos resíduos

### 2.12.1 Generalidades

Baseado nos processos de obtenção, tratamento e fabricação, Lima (1999) classifica os agregados reciclados em três níveis de utilização: aplicáveis sem restrição (pavimentação e proteção de taludes), aplicáveis com restrição (concretos não estruturais, argamassas de assentamento, argamassas de revestimento, componentes pré-moldados, camadas drenantes, aterramentos e estruturas de contenção - gabião) e não aplicáveis (concretos estruturais). Essa classificação é



comprovada por pesquisadores como Zordan & Paulon (1998), os quais concluíram que os concretos produzidos com agregados reciclados atendem as exigências de fabricação de peças de concreto que não exijam resistência elevada (Figura 13).



Figura 13 – Concreto produzido com agregado reciclado: (a) agregado miúdo, (b) agregado graúdo, (c) aspecto do concreto após a mistura e (d) verificação do abatimento.  
Fonte: Lovato (2007).

Vázquez (1997) ressalta que os agregados naturais devem ser reservados para usos nobres, como concretos de alta resistência e concreto protendido. O autor ainda destaca que 80% dos concretos utilizados na Europa necessitam de resistências à compressão entre 20 e 25 MPa, que podem ser obtidas com o agregado reciclado. Zordan (2006) corrobora com essa afirmação, e destaca que as principais limitações na utilização em concretos estão relacionadas baixa resistência à compressão devido às faces polidas do material cerâmico.

O uso de agregados reciclados se estende à produção de elementos de alvenaria, tais como blocos de concreto, tijolos de solo-cimento, painéis pré-moldados, entre outros (Figura 14). Apesar de apresentarem valores satisfatórios,

devem ser tomadas precauções quanto ao uso desses componentes em paredes externas ou subsolos, devido à elevada absorção de água. Além disso, para ligação dos componentes de alvenaria, a fração fina dos agregados reciclados pode ser utilizada na confecção de argamassa. Pesquisas realizadas demonstram que essas argamassas apresentam resultados aceitáveis de aderência, de resistência à compressão e à tração, e também satisfaz as propriedades de módulo de elasticidade e dureza superficial (SOUZA, 2001; LATTERZA & MACHADO, 1997; MIRANDA, 2000; SANTANA, 2001).



Figura 14 – Artefatos produzidos com agregado reciclado.  
Fonte: Santos (2007).

Segundo Angulo & John (2002), a ênfase dada à reciclagem dos RCC para produção de agregados reciclados para a utilização em concretos não parece ser a mais adequada à realidade nacional. Nem todas as usinas adotam processos que melhoram a qualidade dos agregados, como retirada das impurezas, triagem e peneiramento após a britagem. Esses, entre outros fatores, dificultam que o agregado reciclado seja consolidado no mercado. Já a normatização se mostra branda se comparada com padrões internacionais, pois possui restrições que possibilitam somente o uso em concretos não estruturais.

Segundo Lima (1999), a fração graúda dos agregados reciclados possuem resistência e dimensões necessárias para aplicação em *Rip-rap*<sup>1</sup> e gabião. No caso da fração fina, se essa não passar por processos de tratamento, pode ser utilizada

---

<sup>1</sup> *Rip-rap*: Camada relativamente fina e comprida, aproximadamente equidimensional, de rochas e/ou fragmentos duráveis, posicionadas em colchões para dissipar a energia da água e proteger taludes, bancos de canais ou de praias da erosão causadas pela ação do escoamento superficial, correntes, ondas ou gelo.

em aplicações onde as exigências não são muito rígidas, tal como material de aterro. Nesse sentido, Santos (2007) buscou definir uma nova aplicação a essa fração como material de preenchimento de estruturas de solo reforçado. Ensaios de caracterização, de resistência ao cisalhamento e ensaios de arrancamento de geogrelha revelaram que os agregados reciclados apresentaram baixos coeficientes de variação nas suas propriedades e excelente comportamento mecânico, o que demonstra um novo nicho de aplicação para os RCC reciclados (Figura 15).



Figura 15 – Solo reforçado com agregados reciclados.  
Fonte: Santos (2007).

A reutilização de resíduos de concreto e alvenaria como base para as estradas é uma prática comum na Holanda. Molenaar & Van Nierkerk (2002) estudaram o desempenho de materiais a base de concreto reciclado e entulho de alvenaria, medindo parâmetros como a composição, degradação, CBR, entre outros. O estudo concluiu que o grau de compactação é o fator que guia projeto, o qual também condiciona as características mecânicas das camadas de suporte.

Segundo John & Agopyan (2000), as possibilidades de reutilização variam conforme a composição dos resíduos. Agregados homogêneos derivados de peças estruturais, como é o caso do agregado de resíduo de concreto (ARC), devem ser destinados para produção de componentes que necessitam maior resistência. Já os agregados heterogêneos derivados de várias fases da obra devem ter sua aplicação limitada a artefatos que sofrem menor solicitação, como a utilização em contrapisos, camadas drenantes ou aterramento.

Após pesquisar as principais utilizações dos agregados reciclados pelas construtoras brasileiras, Corsini (2011) demonstra as formas de aplicação desses agregados conforme a classificação utilizada para venda do material nas usinas de beneficiamento:

- *Areia*: pode ser usada, inclusive, para concreto estrutural, pois conta com um pouco de cimento no material. Para fazer concreto magro, por exemplo, demanda mais água e menos cimento;
- *Pedrisco*: a principal diferença em relação ao convencional é a financeira. Pode ser usado em peças estruturais, sendo necessário atentar apenas para a proporção. Concretos sem fins estruturais podem contar com 100% do pedrisco reciclado;
- *Britas I e II*: pode substituir totalmente a pedra convencional em qualquer aplicação que não seja estrutural;
- *Bica corrida e bica com cerâmica*: devido à grande quantidade de pó de cimento, para solos muito frágeis e úmidos costuma-se usar bica reciclada para execução de solo-cimento, o que barateia a execução com ganho de resistência. A alta capacidade de absorção da cerâmica exige o uso de uma maior quantidade de água nos casos em que há presença desse material;
- *Rachão*: a versão reciclada substitui totalmente a convencional em qualquer aplicação, inclusive para gabiões;
- *BGS (brita graduada simples)*: como é possível obter qualquer granulometria a partir do material reciclado, pode-se utilizar a BGS para aplicações em geral.

Segundo Zordan (2006), o melhor aproveitamento do produto da reciclagem dos RCC é na sua aplicação em pavimentação. Os resíduos podem ser utilizados, dependendo das suas características e da forma de tratamento, em camadas de base e sub-base, no reforço do subleito e, até mesmo, no revestimento primário (Figura 16). Nesse uso, podem-se utilizar diversos tipos de RCC Classe A, seja somente o agregado reciclado, ou adicionando-se aos solos para fins de estabilização. O autor explica ainda que as principais vantagens dessa utilização são:

- A menor utilização de tecnologia e baixo custo operacional;
- A possibilidade de uso de todos minerais constituintes do entulho;
- A economia de energia de britagem do entulho, por manter a granulometria graúda.



Figura 16 – Utilização de agregados reciclados em pavimentação: (a) “rachão de entulho” colocado sobre o subleito, (b) camada de “rachão de entulho” compactada, (c) motoniveladora espalhando o agregado reciclado e (d) compactação do agregado reciclado.

Fonte: Leite (2007).

O alto custo dos materiais virgens é tido como condicionante principal no desenvolvimento de técnicas que propiciem o uso do agregado reciclado em pavimentação. Esses agregados possuem propriedades distintas dos agregados comumente empregados em pavimentação, por exemplo, o material não é fornecido com uma característica constante. Isso implica um controle tecnológico contínuo, pois, caso haja alteração significativa nas propriedades do agregado reciclado, pode ser necessário uma intervenção para modificação no projeto (MOTTA & FERNANDES, 2003; BENNERT et al., 2000).

Segundo Pinto (1998), um dos fatores que possibilitam o melhor aproveitamento dos agregados reciclados em pavimentação é a distribuição granulométrica das partículas. Embora os resultados das pesquisas apontem granulometria predominantemente graúda, a estabilidade é considerada uma das principais características, pois o entrosamento delas garante maior atrito interno. Outro fator importante é o elevado desgaste que o agregado sofre desde o transporte da usina até a compactação final na pista, esses finos produzidos pela abrasão entre as partículas ajudam a preencher os vazios intergranulares deixados pelas partículas graúdas.

Segundo Fernandes (2004), a cidade de Belo Horizonte é precursora na utilização de agregados reciclados, desde 1996 a prefeitura municipal utiliza esse material para execução de camadas de base e sub-base de pavimentos. O dimensionamento estrutural era baseado nos valores do Índice de Suporte Califórnia dos agregados e também na experiência prática dos engenheiros do município. Para suprir a demanda de agregados, a própria prefeitura estabeleceu uma usina de reciclagem que possibilitava a fabricação de agregados com granulometria semelhante à de britas graduadas. As vias construídas com agregado reciclado possuíam condições de tráfego semelhantes a aquelas executadas com agregados convencionais. Embora não se possa afirmar se houve ou não superdimensionamento das camadas, não foram encontradas patologias que necessitassem de intervenção, somente manutenção como as executadas em vias construídas a base de britas graduadas.

Segundo Bodi et. al. (1995) e Carneiro et. al. (2001), o uso em pavimentação propicia a utilização de grandes volumes desse material, principalmente das suas frações graúdas (material passante na peneira 19mm). Ademais, os agregados reciclados são adequados para serem utilizados em camadas de suporte de pavimentos (reforço do subleito, sub-base e base), pois apresentam baixos percentuais granulométricos de argila e silte.

Algumas pesquisas estão em curso para determinar as principais características que os agregados reciclados devem possuir para que se obtenha o melhor aproveitamento em pavimentação. Por exemplo, Poon & Chan (2006) estudaram o uso de agregado reciclado de concreto e de cerâmica em camadas de sub-base em Hong Kong. Os resultados indicaram que o uso de agregados de reciclados de concreto aumentou o teor de umidade ótima e diminuiu a densidade

máxima seca em comparação com o uso de agregados naturais. Constatou-se também que os valores do CBR (para condições de seco e saturado) dos agregados de concreto reciclado utilizados na sub-base foram menores do que os materiais naturais. Porém, à medida que o agregado de concreto era substituído por agregados cerâmicos, os valores do CBR diminuam.

### 2.12.2 Aplicações em pavimentação

Segundo Carneiro et. al. (2001), a fração miúda (material passante na peneira 4,8mm) dos agregados reciclados equivale-se ao tamanho de partículas de areia, por isso apresenta ausência de plasticidade e comportamento adequado para a estabilização de solos plásticos. Devido as suas características granulométricas, o agregado reciclado possui alta permeabilidade, o que possibilita a sua utilização em camadas drenantes ou em locais com lençol freático elevado.

Carneiro et. al. (2001) afirma que tanto para agregados reciclados graúdos, quanto para miúdos, a expansão não é significativa. Por meio de ensaios de expansibilidade com o agregado in natura e misturando-se com outros materiais, o autor relata que a expansão do agregado in natura é praticamente nula, já na mistura de solos saprolíticos com agregados reciclados, a expansão diminuiu consideravelmente à medida que se aumentou o teor de agregados reciclados finos à mistura, melhorando a estabilidade do material.

Carneiro et. al. (2001) submeteram uma amostra de agregados reciclados a ensaios de caracterização, a fração graúda foi submetida ao ensaio de abrasão Los Angeles, a qual obteve desgaste de 45%, valor considerado elevado se comparado a outros materiais comumente utilizados em pavimentação, no entanto atende a NBR 11804 (ABNT, 1991) para utilização em sub-base e base de pavimentos. Da mesma forma, os agregados miúdos resultaram em 68% para o ensaio de equivalente de areia e limites de consistência de acordo com as especificações da NBR 11804 (ABNT, 1991), demonstrando que ambas as frações atendem as restrições normativas.

Bodi et al. (1995) pesquisaram o comportamento em relação ao CBR de duas misturas: uma de agregados reciclados e solo, e a outra de brita natural e solo. A primeira apresentou aumento do CBR a partir da adição de 20% de agregados

reciclados, enquanto que na segunda isso só foi perceptível com adições maiores que 40%. Da mesma maneira, Carneiro et. al. (2001) misturaram solos laterítico (20% passante na peneira 0,075mm) e saprolítico (70% passante na peneira 0,075mm) com agregados reciclados miúdos e graúdos (Tabela 23). Nota-se que o solo mais fino (saprolítico) possui maior expansão e menor CBR, além de que necessita de maior teores de umidade para compactação. Com a adição de 30% de agregados reciclados graúdos, a expansão diminuiu consideravelmente, e o valor do CBR dobrou. Isso demonstra a melhora significativa que a adição de agregados reciclados propicia aos solos, pois todas as misturas satisfazem as especificações da NBR 11804 (ABNT, 1991) e 15116 (ABNT, 2004), que indicam como CBR mínimo de 12% para reforço do subleito, 20% para sub-bases e de 60% para bases.

Tabela 23 – Comparação dos resultados das misturas contendo agregado reciclado

AMOSTRA	Umidade ótima (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)	Expansão (%)
100% Solo Laterítico	9,3	1,83	114,6	0,14
30% Solo Laterítico / 70% Ag. Rec. Graúdo	14,2	1,82	112	0
100% Solo Saprolítico	22	1,38	25,5	5,69
30% Solo Saprolítico / 70% Ag. Rec. Graúdo	25,8	1,52	50,7	0,65
100% Ag. Rec. Miúdo	16	1,6	70	0
30% Ag. Rec. Miúdo / 70% Ag. Rec. Graúdo	16,2	1,69	100	0

Fonte: Adaptado de Carneiro et. al. (2001).

Carneiro et al. (2001) relatam que as amostras que foram adicionados agregados graúdos apresentaram altos índices de degradação durante o processo de compactação. No entanto, Nogami & Villibor (1995 apud JADOVSKI, 2005) citam que os solos-agregados constituídos de pedregulhos lateríticos e saprolíticos têm apresentado desempenho apropriado para material de base de pavimentos devido à fragmentação parcial dos grãos durante os trabalhos de compactação, mesmo que não satisfaça as condições impostas pelas especificações clássicas. Do mesmo modo, Carneiro et al. (2001) apontam que a quebra das partículas, principalmente as



graúdas, resultou em uma mudança na granulometria do material, melhorando o grau de entrosamento dos grãos na camada compactada.

Leite (2007) pesquisou as características de amostras compostas por agregados reciclados mistos com distribuição granulométrica enquadrada na faixa B do DNIT, então as compactou nas energias intermediária e modificada, para então verificar a mudança de comportamento. Os ensaios de ISC demonstraram um valor médio de 93% para energia intermediária e 117% para energia modificada. O mesmo aconteceu com o módulo de resiliência, o qual variou de 160MPa a 440MPa para energia intermediária e de 200MPa a 500MPa para energia modificada, dependendo do nível de tensões aplicado. Tal fato implicou também a redução da deformabilidade com o aumento de energia, resultando em torno de 10% a 20%.

Motta (2005) observou se a variação do Módulo de Resiliência de agregados mistos era equivalente ao apresentado por britas graduadas, caso ambos os materiais possuíssem granulometria semelhante, as quais foram compostas por distribuições granulométricas densas e diâmetro máximo em torno de 50mm. No entanto, a fração grosseira de ambos os materiais foi substituída como determina a NBR 6457 (ABNT, 1986). Os resultados demonstraram que, quando compactados na energia intermediária, o Módulo de Resiliência mostra-se semelhante para os dois agregados, variando entre 170MPa e 420MPa, dependendo do tempo de cura e da tensão de confinamento.

Reid (2000) analisou os resultados obtidos em uma pesquisa de campo com o objetivo de analisar a evolução do Módulo de Resiliência por meio de *FWD* em uma sub-base constituída de agregados reciclados de concreto. Os resultados apontam que o Módulo de Resiliência atinge os melhores índices quando a tensão atuante varia entre 400kPa e 500kPa, chegando até 470MPa um dia após da execução e a 580KPa quando decorrido um ano da mesma. O autor relata que um dos fatores responsáveis pelo aumento da rigidez da camada com o passar do tempo é a composição da mesma, influenciada pelas propriedades cimentantes do material.

Carneiro et al. (2001) apontam que o custo de construção das camadas de base e sub-base produzidas com agregados reciclados (R\$ 11,00/m<sup>3</sup>) foram consideravelmente menor que as camadas produzidas com britas graduadas (R\$ 26,00/m<sup>3</sup>) ou com britas adicionada ao solo (R\$ 35,00/m<sup>3</sup>), esses valores apresentaram uma economia que variou entre 50% e 62%. Vale ressaltar que os

custos oscilam conforme a distância de transporte, manutenção e durabilidade dos materiais, entre outros.

A instalação de redes subterrâneas de telefonia, lógica, gás, eletricidade, além das tradicionais de água e esgoto, estão em crescimento nos centros urbanos do Brasil. Na mesma proporção, ocorre o aumento das patologias nessas valas devido ao emprego de materiais inadequados ou má execução das camadas. Nesse sentido, Duarte et. al (2011) estudaram os efeitos da adição de agregados reciclados miúdos (passantes na peneira 4,8mm) e cimento em solos de consistência silto-argilosa. Com uma proporção em torno de 30% RCC e 70% solo, e 5% de cimento sobre a massa de agregados reciclados, os resultados demonstraram que os corpos de prova suportaram tensões de 1,0MPa quando submetidos à compressão axial. Embora esse valor seja abaixo do prescrito pela NBR 12253 (ABNT, 1992), que é de 2,5MPa, o autor concluiu que essa mistura melhora as propriedades de solos plásticos e diminui problemas de consolidações devido ao aumento das tensões.

Silva & Padula (2011) avaliaram o comportamento de agregados reciclados aplicados à produção de misturas betuminosas tipo CBUQ. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização dos RCC e dosagens do concreto asfáltico baseados na metodologia Marshall, enquadrados nas faixas “B” e “C” do DNIT com ligantes convencionais: CAPs 30/45 e 50/70. Ao final, foi verificado o comportamento mecânico dessas misturas pelas análises do módulo de resiliência, da resistência à tração e da deformação permanente.

As tabelas 24 e 25 apresentam, respectivamente, a composição das misturas e os resultados do módulo de resiliência e resistência à tração obtidos por Silva & Padula (2011). Através deles é possível notar que a mistura dosada na faixa B, com ligante 30/45 foi a que obteve maior resistência à tração, seguida da mistura na faixa C de mesmo ligante, o que demonstra um ganho percentual de cerca de 15% da faixa B sobre a faixa C. Já nas misturas com a utilização do CAP 50/70, houve uma inversão no comportamento, pois a faixa C foi aproximadamente 24% mais resistente que a faixa B.

Silva & Padula (2011) constataram que durante o ensaio à tração nas misturas com CAP 30/45 os agregados foram mobilizados e contribuíram para maior resistência, pois ocorreu a ruptura dos mesmos, enquanto que nas misturas com CAP 50/70 as rupturas foram mais acentuadas no mastique e na interface agregado/mastique. Os autores também atribuem esta característica à maior

consistência e aglutinação do CAP 30/45, as quais conferem maior resistência à tração. Valores típicos de resistência à tração para misturas asfálticas a quente - recém-moldadas ou logo após a construção, em pista - são apresentados por Bernucci et al. (2006), cujas médias situam-se entre 0,5MPa e 2,0MPa.

Tabela 24 – Composição das misturas.

Materiais	Porcentagem em peso na mistura (%)	
	Faixa C - Misturas 1 e 3	Faixa B - Misturas 2 e 4
Brita 1 RCC	18	43
Brita 0 RCC	40	15
Pó RCC	40	40
Cal Hid. CH1	2	2
Total	100	100

Fonte: Adaptado de Silva & Padula (2011).

Tabela 25 – Resultados do módulo de resiliência e da resistência à tração.

Misturas	Teor de Ligante (%)	MR (MPa)	RT (MPa)
Mistura 1 - Faixa C - CAP 50/70	9,5	3864	0,63
Mistura 2 - Faixa B - CAP 50/70	9,0	3305	0,51
Mistura 3 - Faixa C - CAP 30/45	9,5	6000	1,04
Mistura 4 - Faixa B - CAP 30/45	9,0	7223	1,20

Fonte: Adaptado de Silva & Padula (2011).

Da mesma forma que a resistência à tração, Silva & Padula (2011) verificam que o concreto asfáltico dosado na faixa B, com ligante 30/45, foi o que obteve maior módulo de resiliência, seguido da mistura na faixa C, com o mesmo ligante. O ganho percentual do módulo de resiliência foi da ordem de 20% da faixa B sobre a faixa C. Já nas misturas com a utilização do CAP 50/70, o mesmo comportamento observado no ensaio de resistência à tração foi constatado, ou seja, o MR obtido na faixa B foi inferior ao alcançado na faixa C. Os valores obtidos de módulo de resiliência variaram entre 3300MPa e 7200MPa, conforme Bernucci et al. (2006), os valores típicos podem ser considerados na faixa de 2.000MPa a 8.000MPa.

A partir desses ensaios, Silva & Padula (2011) concluem que em virtude das suas propriedades físicas e mecânicas, associadas aos ligantes utilizados, os RCC são adequados para substituir os agregados naturais em camadas betuminosas. Embora os autores tivessem utilizado misturas que se enquadrassem nas faixas B e C do DNIT para tráfego pesado ( $N > 5 \times 10^6$ ), os mesmos recomendam a utilização em misturas para tráfego leve, em virtude da deficiência de pesquisas nessa área e, por conseguinte, da não consolidação desse material no mercado.

Ferreira et al. (2011) estudaram as propriedades de duas misturas com granulometrias similares, uma confeccionada com seixo e a outra com agregado reciclado, ambas misturadas com emulsão asfáltica. Os resultados mostraram que o agregado reciclado apresentou abrasão em torno de 46%, contra 37% do seixo. Já a absorção do agregado reciclado variou em torno de 7%, e o seixo não apresentou valor significativo. Com relação à emulsão, esta atendia as especificações brasileiras como emulsão catiônica de ruptura lenta. Os resultados também demonstraram que as misturas de emulsão com seixo apresentaram valores de resistência à tração 25% maiores do que as compostas de agregados reciclados, com valores de 0,32MPa e 0,24MPa, respectivamente.

Sabe-se que a utilização de areia-asfalto em revestimentos é prática comum em regiões caracterizadas por solos com espessa cobertura superficial de granulometria fina, e que não possuem usinas de britagem de material pétreo ou quando os valores de transporte até as jazidas se tornam inviáveis. Nesse sentido, Valença et al. (2011) apresentam um novo nicho de aplicação dos RCC reciclados: a utilização da fração miúda dos agregados reciclados na substituição da fração de areia em misturas de areia-asfalto. Os autores ensaiaram amostras com areias comumente utilizadas e também com a adição de agregados reciclados finos, tanto para misturas quentes, quanto mornas. Os resultados demonstraram que as misturas compostas pelos agregados reciclados obteve maior resistência à tração e menor deformação dos corpos de prova, fato que foi associado à presença de frações cimentícias na constituição dos RCC.

Hortegal et al. (2009) estudaram a mistura de diferentes proporções de resíduos graúdos adicionados a um solo de consistência arenosa visando à aplicação em pavimentação. Os resultados mais importantes dessa pesquisa são apresentados na Tabela 26, a qual pode-se constatar o comportamento instável do material, pois a variação da umidade ótima não acompanhou as diferentes adições

de RCC a mistura. Era de se esperar que conforme fosse acrescentado RCC à mistura, a umidade ótima aumentasse. Com relação aos valores de CBR, todas as amostras satisfazem as condições da NBR 15116 (ABNT, 2004) (Tabela 20) para utilização em reforço de subleito, já para revestimento primário e sub-base, somente as misturas 2 e 3 se mostraram aptas.

Tabela 26 – Resultados do ensaio de compactação e CBR das amostras

Amostra	Composição	$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	Umidade ótima (%)	CBR (%)
Solo	Arenoso	18,3	4,4	17
Mistura 1	70% solo 30% RCC	17,7	8,1	13
Mistura 2	50% solo 50% RCC	18,6	4,5	27
Mistura 3	30% solo 70% RCC	19,3	7,4	54

Fonte: Adaptado de Hortegal et al. (2009).

Assis et al. (2005) e Costa et al. (2010) avaliaram o comportamento temporal de camadas de base e sub-base construídas com agregado reciclado em um pavimento experimental submetido a tráfego pesado. Assis et al. (2005) relata que os valores de deflexão máxima no revestimento mantiveram-se próximos, com valores de  $43 \times 10^{-2}$  mm após a execução das camadas e de  $41 \times 10^{-2}$  mm após nove meses de funcionamento. Na mesma pista experimental, Costa et al. (2010) avaliou o comportamento após quatro anos de funcionamento. Os resultados demonstraram que o valor de serventia atual era classificado em 4,5, considerado ótimo pelo tempo de funcionamento, e a deflexão máxima manteve-se com valores médios de  $53 \times 10^{-2}$  mm. A partir dos parâmetros obtidos, os autores concluem que o trecho experimental apresenta bom comportamento funcional, pois não apresentou problemas estruturais.

### 2.13 Dimensionamento de pavimentos flexíveis

Segundo Balbo (2007) e Bernucci et. al.(2006), dimensionar um pavimento significa conceber uma estrutura capaz de suportar um volume de tráfego preestabelecido, nas condições climáticas e geotécnicas locais, oferecendo o desempenho desejado nos aspectos de segurança (boas condições de regularidade,

drenagem e aderência) e conforto (tratamento visual adequado, com baixa incidência de ruído e boas condições da superfície).

Conforme Balbo (2007), existem diversos tipos de dimensionamento, sendo que cada um se aproxima das condições ambientais, geológicas, pedológicas e de tráfego dos lugares onde foram concebidos. No entanto, o autor cita que a principal razão para essas diferenças é atribuída a não existência de uma descrição unânime e precisa, em termos quantitativos, da maneira como efetivamente se constitui a ruptura de um pavimento. Atualmente, o principal motivo da ruptura dos pavimentos está associado à repetição de cargas sobre as estruturas do pavimento, as quais destacam-se quatro causas que decorrem dessa característica:

- a) Fenômeno da fadiga: responsável pelo trincamento de revestimentos betuminosos e bases cimentadas;
- b) Acúmulo de deformações plásticas (permanentes) pela ação das deformações cisalhantes que ocorrem em camadas de misturas asfálticas, em materiais granulares e nos solos do subleito.
- c) Reflexão de trincas: provenientes de defeitos de camadas subjacentes ao revestimento.
- d) Rupturas por cisalhamento: movimentação de corte normal à trinca, as faces da trinca deslocam-se uma em relação à outra perpendicularmente à sua borda.

Na bibliografia encontram-se diferentes métodos de projeto, os quais foram concebidos de maneiras distintas: com base no desempenho observado ao longo do tempo (obtidos pelas experiências em campo) ou a partir de teoria elástica considerada adequada para interpretação dos fenômenos físicos quantificados em campo. Sob esse prospecto, Balbo (2007) resume o funcionamento de três tipos de métodos de dimensionamento existentes:

- a) Método empírico: fruto da modelagem estatística da evolução de parâmetros físicos observados nos pavimentos em serviço;
- b) Método semi-empírico: fruto da extrapolação e expansão de resultados empíricos com base em uma teoria analítica consistente;

- c) Método empírico-mecanicista: fruto da calibração de modelos teóricos com dados experimentais obtidos em campo e em laboratório.

Balbo (2007) relata que, frente a essa diversidade de métodos, não se pode afirmar que um critério seja absolutamente válido ou completamente satisfatório. Cada critério apresenta vantagens e desvantagens inerentes à consideração de parâmetros físicos e numéricos, campo de aplicação e simplicidade de utilização. Dessa forma, deve-se escolher o método que mais se adapta às condições regionais existentes e aos critérios de projeto definidos. Entre os métodos mais utilizados para dimensionamento de pavimentos no Brasil, destacam-se o Método do CBR (ou do DNER/1966) e Método da Resiliência, os quais estão disponíveis no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).

### 2.13.1 Análise Mecanicista

Considerando a resistência dos materiais, elementos da estrutura sujeitos a esforços de quaisquer natureza devem ser verificados quanto à sua capacidade de resistir a uma diversidade de esforços. Se forem conhecidos, esses esforços podem ser relacionados com modelos de degradação por fadiga ou por deformação plástica dos materiais empregados em pavimentação. Portanto, a análise mecanicista serve para estabelecer relações entre os principais esforços atuantes nos pavimentos e o seu desempenho após a execução (BALBO, 2007; MEDINA & MOTTA, 2005).

Para que isso aconteça, uma análise funcional deve ser elaborada com a finalidade de avaliar se os materiais que serão empregados no pavimento satisfazem as condições impostas no local que será aplicado. Os critérios e normas vigentes devem ser empregados para o dimensionamento das possíveis alternativas a serem usadas no pavimento (BALBO, 2007; MEDINA & MOTTA, 2005). Em suma, a análise mecanicista busca:

- a) Determinar a estrutura mais apropriada para projetos;
- b) Controlar a qualidade estrutural das camadas a serem executadas;
- c) Determinar a vida útil remanescente de um pavimento;
- d) Avaliar a estrutura do pavimento para eventual restauração;

- e) Selecionar a carga por roda que será permitida no pavimento (geralmente quanto o pavimento já esteja construído).

A partir desses fatores, busca-se analisar os critérios que condicionarão a vida útil por meio da seleção de estruturas de pavimentos (Figura 17), o que engloba, principalmente, a análise de atendimento a critérios de fadiga, previsão do desempenho de cada alternativa proposta e a determinação dos custos implícitos em cada uma. De posse desses resultados, busca-se a estrutura de pavimento mais consistente, que satisfaça as especificações e os critérios técnicos-econômicos. Caso as condições não satisfaçam essas características, procede-se com a retroanálise, ou seja, procura-se simular uma estrutura condizente com o comportamento dos materiais em questão a partir da resposta fornecida por eles quando solicitados por carregamentos em ensaios chamados não destrutivos, então verifica-se para quais parâmetros o modelo analítico consegue representar as respostas obtidas em campo (BALBO, 2007; MEDINA & MOTTA, 2005).

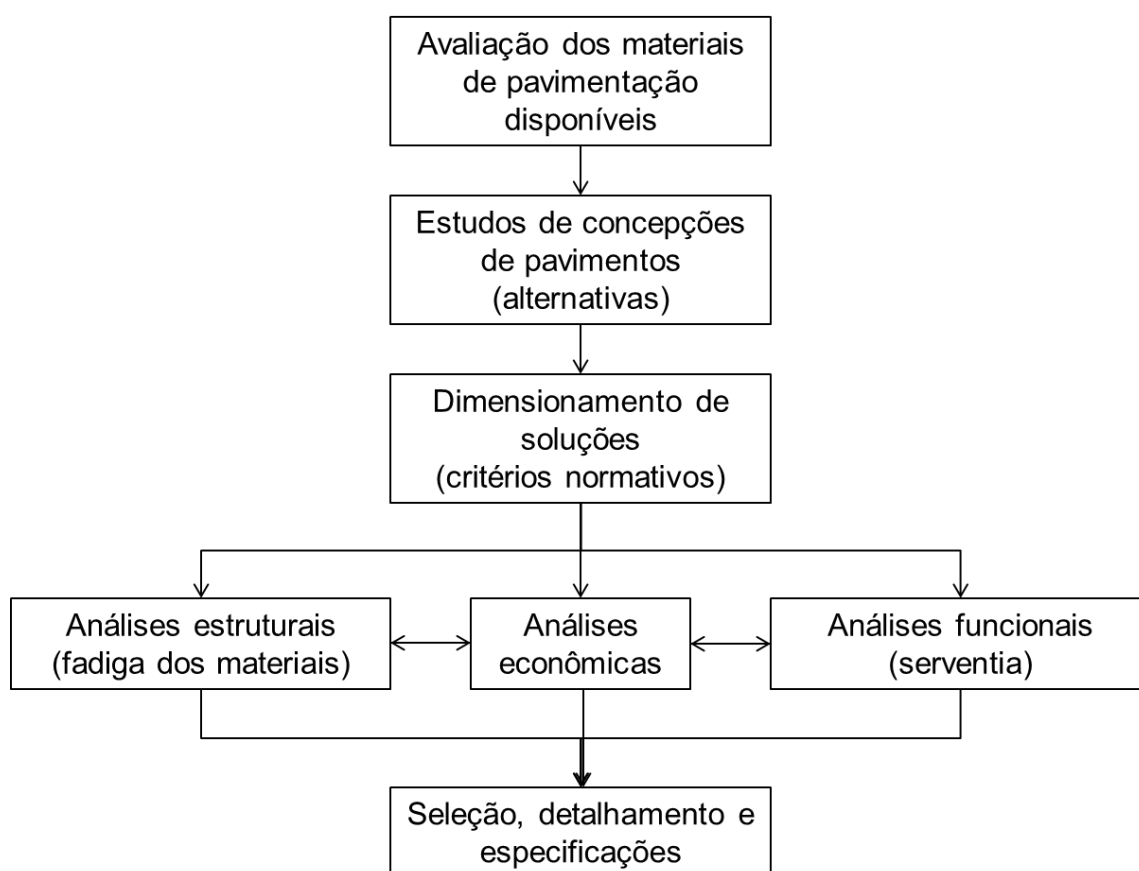


Figura 17 – Processo de seleção de estruturas de pavimentos  
Fonte: Adaptado de Balbo (2007)



### 2.13.2 Determinação dos esforços atuantes por meio de ferramentas computacionais

Para complementar e executar a análise mecanicista é importante ter disponível uma ferramenta que permita calcular as tensões, deformações e deslocamentos em diversos pontos de uma estrutura de um pavimento. Além disso, devem apresentar certa confiabilidade e precisão nos resultados (FRANCO, 2007).

Há vários programas para análise desses esforços que já foram citados na literatura, porém dentre os mais utilizados citam-se o FEPAVE, o RIOPAWE, o ELSYM5, o JULEA e o MnLayer. Ressalta-se ainda que essas ferramentas podem utilizar um dos processos de cálculo existentes: o que calcula analiticamente, pela teoria de Burmister, ou cálculo pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Isso depende, entre outros fatores, da situação do carregamento que pode fazer com que os métodos assumam condições de contorno variadas (FRANCO, 2007).

Sob esse ponto de vista, Franco (2007) buscou facilitar a análise e dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos através da criação do programa “SisPav”, que congrega os dois processos de cálculo: MEF e análise elástica de múltiplas camadas. Assim, o projetista pode optar pelo mecanismo de análise, como também comparar os resultados de ambos os processos.

Khazanovich & Wang (2007), desenvolvedores do “MnLayer”, que é baseado no sistema elástico de camadas, definem-no como sendo um programa de análise de alta performance para camadas elásticas que apresenta maior precisão frente aos demais, especialmente nos pontos de avaliação localizado perto da superfície ou a grandes profundidades. Por isso, optou-se pela utilização desse programa, já que se trata de uma ferramenta de análise de alto desempenho para avaliação de camadas elásticas, e possibilitou calcular tensões, deformações e deflexões tanto para um pavimento de estrutura simples, como para um pavimento com várias camadas solicitado por uma ou mais cargas, sendo que cada carga é aplicada em uma área circular e com pressão uniforme. A Figura 18 demonstra a interface gráfica do programa “MnLayer” apresentando alguns resultados de uma análise.

EstPad.txt - MNLAYER

File Edit Tools Run Help

General Layers Loads Analysis Points Results

Result Format:  Report  Table

Unit:  SI  US Cost

Problem 1

Problem	Point	Strain	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement
-	-	ZZ	YZ	XZ	XY	XX	YY	ZZ
-	-	-	-	-	-	mm	mm	mm
1	1	1.2599E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	6.4022E-01
1	2	1.6429E-04	0.0000E+00	-2.8634E-07	0.0000E+00	-1.7366E-02	0.0000E+00	6.3474E-01
1	3	-1.6139E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	6.3903E-01
1	4	-3.4009E-04	0.0000E+00	-5.0028E-12	0.0000E+00	1.9749E-02	0.0000E+00	6.2825E-01
1	5	-1.7409E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.0394E-01
1	6	-1.5864E-04	0.0000E+00	-1.4679E-06	0.0000E+00	-1.1432E-02	0.0000E+00	4.7336E-01

Figura 18 – Interface gráfica do programa “MnLayer”

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia utilizada nessa pesquisa procurou contribuir para a redução de duas lacunas presentes na literatura técnica nacional: a insuficiência de indicadores acerca da eficácia dos programas de gestão de resíduos da construção civil e a carência de métodos confiáveis que propiciem a reutilização dos agregados reciclados em pavimentação.

Para alcançar essas finalidades, a pesquisa se apresenta dividida em quatro partes principais: coleta de dados acerca dos RCC em âmbito regional, pesquisas de campo, procedimento experimental e análise técnico-econômica.

#### **3.1 Estudo de escritório**

O estudo de escritório baseou-se na obtenção de dados a respeito dos RCC em âmbito regional. Além disso, serviu de suporte teórico para o conhecimento da situação dos RCC e dos processos que envolvem os agregados reciclados no município, congregando informações que englobam a geração, ações e locais que propiciam o descarte irregular, atuações que favorecem a disposição final correta, tratamento em área licenciada e procedimentos para obtenção do material beneficiado.

De posse dos dados produzidos no município, esse estudo também serviu de base comparativa para analisar a evolução temporal dos modelos de gerenciamento e gestão existentes. Analogamente, na etapa final da pesquisa, o estudo propiciou a escolha de ferramentas para análise de esforços que atuam sobre os pavimentos executados com britas graduadas e agregados reciclados, assim como a obtenção de certos parâmetros para executar essa análise.

#### **3.2 Análise dos sistemas de gerenciamento, gestão e reciclagem**

Primeiramente, esta etapa compreendeu uma pesquisa de campo acerca da situação dos RCC, destacando as principais formas de gerenciamento e disposição final dos resíduos. Esta fase também relatou as principais consequências que o

manejo incorreto dos RCC pode acarretar, assim como destacou os inconvenientes por eles causados.

Juntamente com esse processo, analisou-se a evolução do sistema de gestão de resíduos adotado no município, destacando o que ocorria antes e após a implantação do mesmo, a legislação atual, a eficácia da fiscalização, os fatores condicionantes para eficiência do sistema e as práticas consolidadas.

Por meio de visitas técnicas e observações em campo, foram analisados os sistemas de coleta, reciclagem, tratamento e beneficiamento dos RCC no município. Da mesma forma, efetuou-se uma pesquisa para obtenção de dados qualitativos a respeito dos locais de descarte irregular e os resíduos destinados a eles. Em contrapartida, procuraram-se ações implantadas que buscam diminuir esses índices.

### **3.3 Obtenção do material**

A usina de reciclagem de resíduos da construção civil de Santa Maria está localizada junto a Área de Transbordo e Triagem (ATT) de resíduos, é propriedade de uma empresa privada que realiza os processos de tratamento definidos na Resolução 307 do CONAMA (CONAMA, 2002), seguindo com a reciclagem dos RCC para obtenção de agregados reciclados e posterior disponibilização para venda. Com base nessas informações, realizou-se uma reunião com os proprietários da empresa, os quais apoiaram e doaram o produto obtido na usina.

Assim, conforme estabelecido no planejamento, foram executadas três coletas em meses e anos distintos (Abril e Outubro de 2009; e Fevereiro de 2011). Dessa forma, pretende-se verificar a variabilidade na composição dos resíduos e o seu comportamento perante as diferentes estações do ano, pois sabe-se que para obter uma maior produção, geralmente o cronograma das obras prevê que as etapas construtivas sejam realizadas conforme as condições climáticas (principalmente pluviométricas) propiciadas pelas diferentes estações.

### 3.4 Procedimento experimental

Por meio de análises físicas, químicas e mecânicas, esta etapa compreende a caracterização laboratorial dos materiais coletados. A execução desse procedimento obedecerá a critérios determinados pela normatização rodoviária e pelas normas referentes à utilização de agregados reciclados em pavimentação.

#### 3.4.1 Análise granulométrica

As amostras retiradas da usina de beneficiamento foram submetidas ao ensaio prescrito na norma rodoviária DNER–ME 83 (DNIT, 1998) referente a agregados, para que se possa analisar a granulometria, o diâmetro máximo e os parâmetros da curva granulométrica de cada coleta (Figura 19). Dessa forma, pôde-se verificar se há diferença entre as distribuições granulométricas das partículas provenientes das três coletas.



Figura 19 – Agregados submetidos à análise granulométrica.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

### 3.4.2 Caracterização quali-quantitativa das partículas

Paralelamente à análise granulométrica, procedeu-se a caracterização das amostras com a separação das partículas conforme as classes apresentadas na Resolução 307 do CONAMA (CONAMA, 2002). Ao utilizar o processo de catação (Figura 20), determinaram-se os tipos e porcentagens de resíduos de acordo com o tamanho das partículas retidas nas malhas das peneiras que definem a granulometria graúda (maiores que a peneira 4,8mm). Assim foi possível determinar a quantidade de contaminantes - resíduos de Classe B, C e D - presentes nas amostras.



Figura 20 – Caracterização quali-quantitativa por meio da separação por catação.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

### 3.4.3 Resistência ao desgaste por abrasão

Este ensaio objetivou verificar o desgaste físico sofrido pelo agregado quando colocado juntamente com uma carga abrasiva (Figura 21). O ensaio serviu para prever o comportamento dos agregados reciclados perante choques mecânicos. Para isso, os agregados foram submetidos ao ensaio conforme a granulometria correspondente a “Graduação A” prescrita na norma rodoviária DNER–ME 35 (DNIT, 1998).

Em função das características semelhantes, os agregados coletados em Abril e Outubro de 2009 foram misturados e, para realização de ensaios futuros, serão chamados de “AM-2009”, já os agregados provenientes da coleta realizada em Fevereiro de 2011 serão chamados de “AM-2011”. Dessa forma, realizaram-se ensaios com os agregados provenientes dessas duas amostras para verificar se entre elas há grande dissemelhança na resistência a abrasão.



Figura 21 – Máquina para realização do ensaio de abrasão “Los Angeles”.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

#### 3.4.4 Durabilidade frente às intempéries

Este ensaio teve como objetivo demonstrar o desgaste químico que o material sofre por meio do contato com substâncias corrosivas (sais). Conforme descrito na DNER–ME 089 (DNIT, 1994), os agregados foram separados conforme o tamanho das partículas, imersos em soluções compostas por sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e submetidos aos ciclos de molhagem e secagem (Figura 22). Da mesma forma que o item anterior, foram analisadas amostras provenientes de AM-2009 e AM-2011, e assim pôde-se perceber se há diferença na deterioração sofrida por ambos.

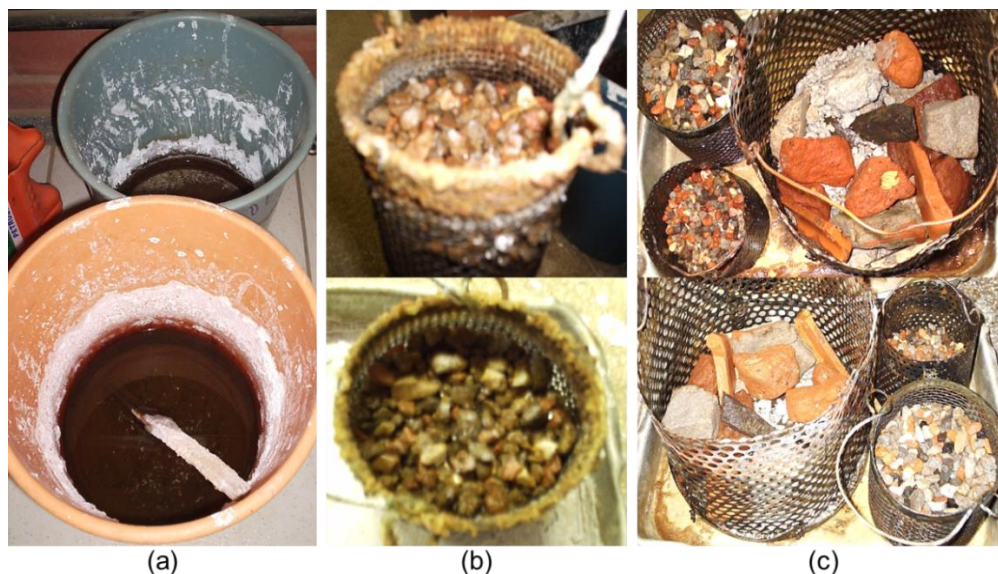


Figura 22 – Ensaio de durabilidade por ataque de sais: (a) preparação da solução, (b) sais agregados às amostras durante os ciclos de molhagem e secagem, (c) deterioração resultante.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

#### 3.4.5 Composições granulométricas

Para obtenção das composições granulométricas, que serão utilizadas para as misturas, os agregados reciclados foram separados por peneiramento conforme quatro tamanhos comerciais de britas (2", 3/4", 3/8" e material passante na peneira N<sup>o</sup>4 - 4,75mm). Como a distribuição granulométrica apresentou-se majoritariamente graúda, os agregados reciclados foram britados em laboratório, com auxílio de um britador de mandíbulas de pequenas dimensões (Figura 23), para que se adequassem a fração N<sup>o</sup>4.



Figura 23 – Britador de mandíbulas utilizado em laboratório.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).



Com a finalidade de estudar entre outros aspectos a diferença de comportamento em relação fração miúda (passante na peneira N°4 - 4,75mm) conforme se eleva a finura da mesma, realizaram-se ensaios com duas composições, as composições provenientes de AM-2009 tiveram a fração miúda obtida somente pelo material passante na peneira 4,75mm e da britagem de suas partículas mais grosseiras; já as amostras que utilizaram agregados derivados de AM-2011 obtiveram essa fração de forma semelhante a anterior relatada, porém o material passante foi rebitado no seu todo para obtenção de partículas ainda mais finas.

A partir dessa distinção, e com ajuda de planilhas eletrônicas, as composições foram dosadas para que se enquadrassem nos limites descritos pela norma rodoviária DNIT 141-ES (DNIT, 2010), que especifica as faixas granulométricas para material granular em bases de pavimentos conforme diferentes volumes de tráfego (Tabela 27), e assim foram ensaiadas para observar o comportamento exibido diante das distintas granulometrias.

Tabela 27 - Especificações para material granular conforme volume de tráfego.

Tipos	N > 5x10 <sup>6</sup>				N < 5x10 <sup>6</sup>		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
<b>Faixas</b>							
Peneiras	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30 - 65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
n°4	25 - 55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100	±5
n°10	15 - 40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
n°40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
n°200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: DNIT 141-ES (DNIT, 2010).

#### 3.4.6 Absorção e Massa específica

Para análise da absorção e massa específica (Figura 24), ambas as composições granulométricas graúdas (2", 3/4" e 3/8") foram submetidas aos ensaios propostos pela norma DNER-ME 195 (DNIT, 1997), já as composições

miúdas, passante na peneira N<sup>o</sup>4, foram ensaiadas conforme a norma DNER–ME 194 (1998).

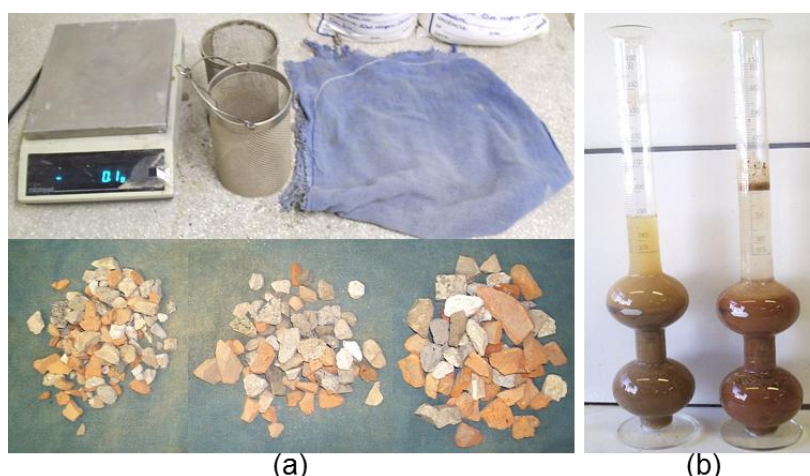


Figura 24 – Materiais e equipamentos para realização da massa específica de: (a) agregados graúdos e (b) agregados miúdos.

Fonte: Acervo do Autor (2011).

### 3.4.7 Compactação

Para determinação da massa específica aparente seca máxima e a respectiva umidade ótima, foram dosadas amostras a partir dos arranjos granulométricos obtidos com as composições. Os arranjos escolhidos foram os enquadrados nas faixas “A” (tráfego pesado, material mais grosseiro), “C” (tráfego pesado, material mais fino) e “E” (tráfego leve) da norma rodoviária DNIT 141–ES (DNIT, 2010).

Foram moldados dois lotes de amostras englobando as faixas descritas acima com agregados provenientes de AM-2009 e outros dois lotes com agregados procedentes de AM-2011, ambas as faixas foram compactadas nas energias normal e intermediária, como prescreve a NBR 15116 (ABNT, 2004) para aplicação de agregados reciclados em pavimentação. O ensaio foi executado com amostras não trabalhadas, ou seja, sem reuso, como descrito na norma DNER – ME 129 (DNIT,1994) (Figura 25). Esse procedimento serviu para observar a variação da massa específica seca máxima e da umidade ótima conforme a granulometria das faixas e também perante o aumento da finura da fração miúda.

Antes e após a execução da compactação executaram-se ensaios de análise granulométrica com cada um dos arranjos utilizados. Então, determinou-se a variação granulométrica para cada faixa e, por conseguinte, a proporção de partículas que sofreu diminuição no tamanho em virtude dos choques mecânicos.

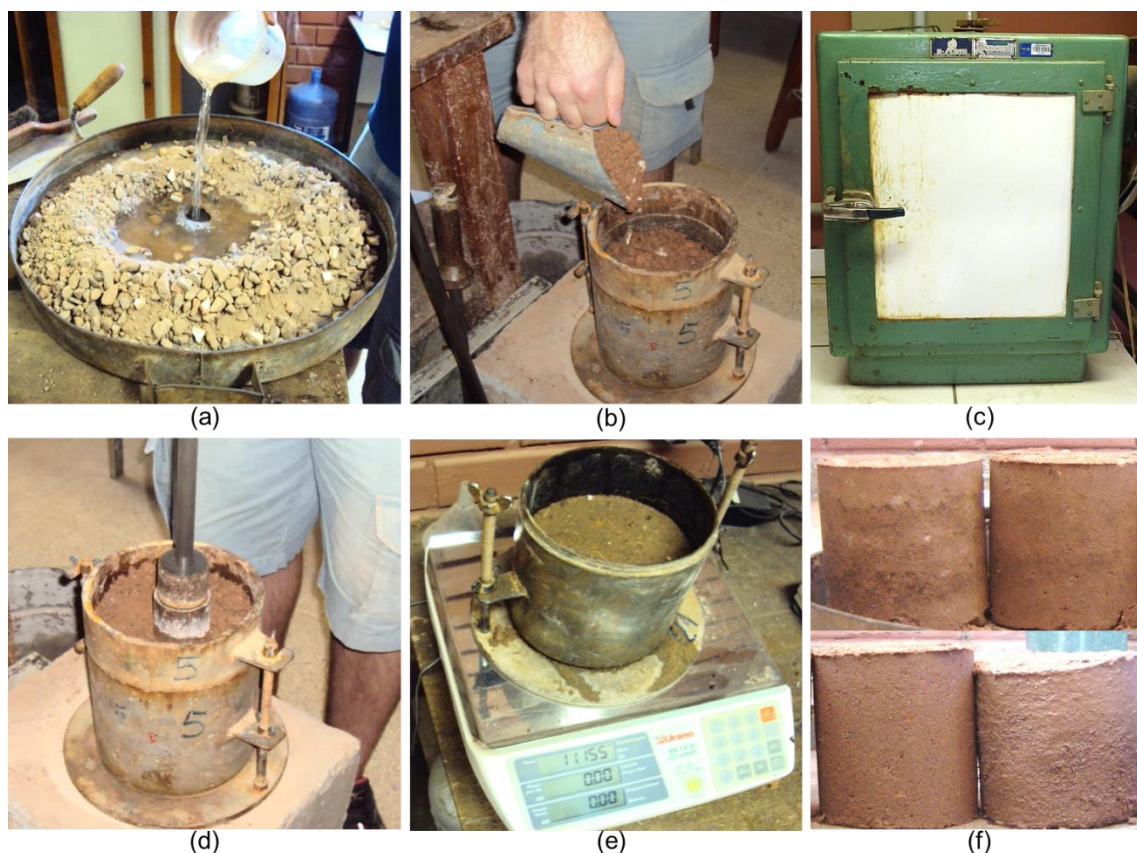


Figura 25 – Ensaio de compactação: (a) mistura da água com proporções definidas, (b) homogeneização da amostra e retirada da parcela para análise da umidade, (c) secagem dos agregados para determinação da umidade, (d) execução da compactação com soquete manual, (e) pesagem do agregado compactado e (f) extração das amostras.

Fonte: Acervo do Autor (2011).

#### 3.4.8 Índice de forma e Lamelaridade

As amostras foram submetidas aos ensaios de Índice de Forma e Índice de Lamelaridade (Figura 26), conforme descrito nas normas NBR 7809 (ABNT, 1993) e DAER/RS-EL 108 (2001), respectivamente. As amostras foram ensaiadas antes e após a realização do ensaio de compactação para observar a influência da forma no comportamento dos agregados, principalmente no que se refere ao embricamento das partículas.



Figura 26 – Determinação do (a) índice de forma e (b) lamelaridade.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

Sabe-se que o cenário ideal seria realizar os ensaios antes e depois da realização da compactação de cada amostra, para então obter de valores de maior significância. Porém, em função da quantidade de ensaios e do período limitado para execução, optou-se pela realização do ensaio de índice de forma com o produto dos agregados provenientes de AM-2009 e AM-2011, isto é, os ensaios executados antes da compactação utilizaram amostras originárias da primeira granulometria, realizada após as coletas, pois para constituir as composições foi necessária somente a separação das frações que são delimitadas para utilização nesse ensaio. No entanto, para analisar a variação do índice de forma após os choques mecânicos, as amostras de todas as faixas e energias foram misturadas conforme a procedência após a realização do ensaio de compactação, assim separou-se uma parcela significativa de mesma massa que as utilizadas antes da execução do ensaio.

Para análise do índice de lamelaridade utilizaram-se as mesmas amostras que passaram pela análise da variação do índice de forma, pois o ensaio não possuía caráter destrutivo, porém nas devidas proporções requeridas pela norma. Somente executou-se esse ensaio com amostras procedentes de AM-2011, já que seriam as mais afetadas pelos golpes do soquete. Esse procedimento serviu para estimar grosseiramente a mudança que acontece na forma dos agregados após a ação de compactadores.

### 3.4.9 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O carregamento que uma camada de pavimento pode suportar sem que ocorram acentuadas patologias pode ser estimado pelo ensaio de ISC. Por isso, a partir dos resultados dos ensaios de compactação, foram moldadas amostras referentes a todas as faixas adotadas, utilizando-se a energia normal e intermediária na correspondente umidade ótima de cada. Então, as amostras foram submetidas ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia, conforme delimitado pela DNER – ME 049 (DNIT, 1994) (Figura 27).

No entanto, o segundo lote procedente de AM-2011, que foi executado com mesmos procedimentos descritos no ensaio de compactação, foi submetido a uma modificação. Após a moldagem dos corpos de prova, todos foram submetidos diretamente ao ensaio de ISC, sem que esses ficassem quatro dias em imersão até ficarem saturados. Esse procedimento serviu para observar a variação da resistência das amostras com o aumento da umidade e também a diferença em relação às amostras submetidas à saturação.

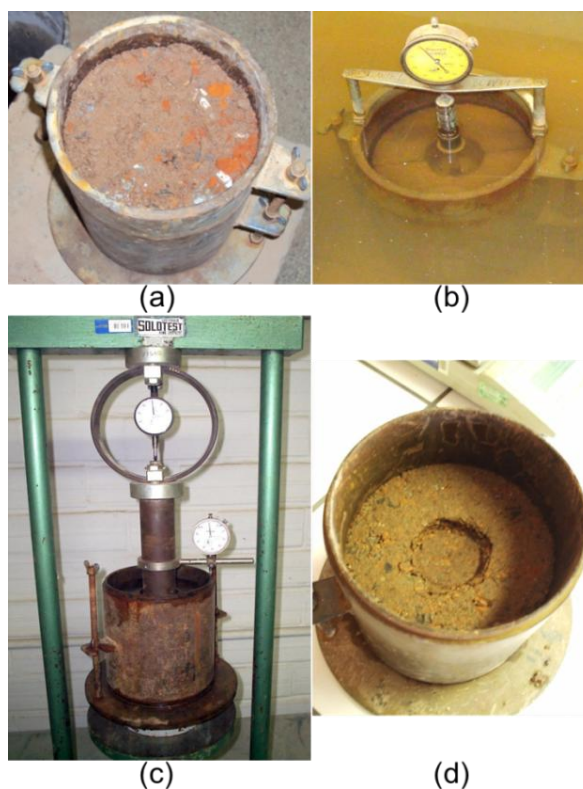


Figura 27 – Execução do ensaio de ISC: (a) compactação da amostra na umidade ótima, (b) imersão da amostra por 96 horas, (c) execução do ensaio logo após o período de saturação e (d) amostra rompida após o ensaio.

Fonte: Acervo do Autor (2011).

### 3.4.10 Permeabilidade

Para estimar a percolação da água nas camadas do pavimento, serão moldadas amostras procedentes de AM-2011 na umidade ótima conforme faixa e energia correspondente. A partir disso, as amostras serão submetidas ao ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade (Figura 28), conforme descrito na NBR14545 (ABNT, 2000), correspondente à percolação com carga variável.



Figura 28 – Ensaio de percolação com carga variável.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

### 3.4.11 Resistência à compressão simples

No meio rodoviário, o ensaio para determinação da resistência à compressão simples é geralmente utilizado para analisar misturas cimentadas, como solo-cimento ou brita graduada tratada com cimento. Entretanto, como grande parte dos agregados reciclados é composta por derivados de cimento, esse ensaio teve como objetivo analisar se haveria elevação da resistência ao longo do tempo e também o comportamento das amostras sem que estivessem confinadas (como acontece no CBR).

Porém, não há descrição normativa para realização desse ensaio quando se trata de agregados reciclados, por isso foram tomados como base alguns princípios descritos na especificação DNER-ME 180 (DNIT, 1994) para amostras estabilizadas com cinza volante e cal hidratada (Figura 29). As amostras ensaiadas são procedentes de AM-2011, foram moldadas na densidade e umidade ótima resultadas do ensaio

de compactação correspondente às faixas A, C e E, todas compactadas na energia intermediária.



Figura 29 – Execução do ensaio de resistência à compressão simples.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

O valor da resistência à compressão simples é definido pela relação entre a carga aplicada axialmente e a área da seção transversal do corpo-de-prova, e pôde ser calculado conforme a expressão (1):

$$RCS = \frac{F}{A} \quad (1)$$

onde:

RCS: Resistência à Compressão Simples (MPa);

F: força aplicada axialmente (N);

A: área da seção do corpo de prova (mm).

#### 3.4.12 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral busca determinar a máxima tensão a que pode ser submetido um corpo de prova (Figura 30), no sentido diametral, até que o mesmo seja rompido por tração. Em pavimentação, o ensaio visa simular o que pode ocorrer numa estrutura do pavimento quando uma determinada carga é aplicada e a parte inferior da camada passa a ser tracionada por flexão, devendo resistir com coesão ou cimentação (se houver), e não só por compressão.



Figura 30 – Execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

Como também não existe descrição normativa a respeito desse ensaio para agregados reciclados, os procedimentos para execução do mesmo foram baseados na especificação DNER–ME 181 (DNIT, 1994) para solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada. Já as amostras utilizadas no ensaio foram moldadas da mesma maneira que o item 3.4.11 e também teve como objetivo analisar se há aumento da resistência das amostras quando submetidas ao processo de cura um curto período de tempo.

O valor da resistência à tração por compressão diametral é definido por uma relação entre a carga aplicada e as características geométricas do corpo-de-prova (para essa pesquisa utilizou-se corpos de prova de 100mm de diâmetro e 63mm de altura), sendo calculado conforme a expressão (2):

$$RTCD = \frac{2.F}{\pi.d.h} \quad (2)$$

onde:

*RTCD*: Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa);

*F*: carga de ruptura (N);

*d*: diâmetro do corpo de prova (mm);

*h*: altura do corpo de prova (mm).



### 3.5 Análise da viabilidade econômica

De posse dos resultados referentes ao procedimento experimental, partiu-se para a análise da viabilidade econômica que, de forma simplista, buscou relacionar custos entre a execução de uma camada com agregados reciclados e com brita graduada simples (BGS). No entanto, a simples troca da BGS por agregados reciclados não é coerente, pois os materiais apresentam características diferentes quando solicitados pelo mesmo carregamento. Por isso, foi necessária a adoção de medidas que colocassem ambos os materiais em igualdade de condições. Optou-se então por dimensionar uma estrutura com os critérios de projeto cedidos pela Enecon (2007), relativos a um pavimento executado em uma das vias de acesso ao campus da UFSM.

#### 3.5.1 Dimensionamento de uma estrutura de pavimento

Primeiramente, dimensionou-se um pavimento com emprego de BGS para servir como elemento de comparação com outro composto de agregado reciclado. O dimensionamento foi baseado no conhecido método do DNER, o qual está disponível no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), e utiliza como critérios principais de projeto o número de veículos que passa sobre a via e o CBR do subleito.

Como o objetivo da pesquisa é determinar custos, não foram levados em consideração detalhes construtivos, como, por exemplo, limitar a espessura máxima da camada. Os coeficientes adotados para os dimensionamentos foram retirados do projeto da via, cedidos pela Enecon (2007), ou dos parâmetros estipulados por Balbo (2007).

A estrutura do pavimento foi dimensionada com apenas duas camadas sobre o subleito, a camada de base de BGS e o revestimento composto por Concreto Asfáltico (CA). A partir do dimensionamento executado, partiu-se para a análise das tensões geradas nas diferentes camadas pelos carregamentos.

### 3.5.2 Análise mecanicista

A análise mecanicista teve como objetivo analisar as respostas que o pavimento dimensionado com BGS oferece quando solicitado pelo eixo padrão (Eixo Simples de Rodas Duplas de 80kN). Para realizar essa análise, utilizou-se o Módulo de Resiliência da BGS utilizada no projeto original e uma ferramenta computacional para o cálculo dos esforços, o programa MnLayer, desenvolvido pela Universidade de Minnesota em conjunto com a Universidade de São Paulo (Figura 18).

O programa analisou, entre outras características, a deflexão máxima no topo do revestimento, a deformação específica máxima de tração no fundo do revestimento e a tensão máxima de compressão no topo do subleito. Outros esforços foram analisados pelo programa, porém somente os citados acima foram considerados para a comparação com o pavimento constituído por agregados reciclados.

De posse das respostas oferecidas pelo pavimento composto de BGS, partiu-se para o dimensionamento de uma estrutura constituída por agregados reciclados que apresentasse esforços semelhantes. Por questões técnicas não foi possível a realização de ensaios de Módulo de Resiliência com os agregados reciclados utilizados nessa pesquisa. No entanto, os agregados reciclados da pesquisa de Leite (2007) apresentaram resultados semelhantes no que se referem à granulometria, CBR e composição, por isso, utilizou-se o menor e o maior parâmetro encontrado pela autora, além de um parâmetro médio, em relação ao Módulo de Resiliência.

A partir disso, partiu-se para o dimensionamento de pavimentos que usavam agregados reciclados pelo método das tentativas, estimando somente os valores para a espessura da camada de base até que a mesma resultasse esforços semelhantes aos apresentados pela estrutura de BGS, repetindo-se o processo para cada valor de Módulo de Resiliência adotado.

### 3.5.3 Estimativa de custos

Ao obter as estruturas correspondentes, calculou-se a diferença de valores para construção hipotética de um quilômetro de base dessa via construída com BGS e com agregados reciclados. A análise englobou processos relativos à obtenção dos

materiais, britagem, usinagem, maquinário, mão de obra, entre outros fatores que contribuem para os custos referentes à execução dessa camada.

Para essa comparação foram utilizadas as tabelas de construção rodoviária e atividades auxiliares disponíveis no Sistema de Custos Rodoviários (SICRO) (DNIT, 2011) referentes à Setembro de 2011. Como a execução de ambas as estruturas utilizam os mesmos métodos construtivos, a comparação baseou-se na troca de alguns valores das tabelas referentes à “Brita produzida em central de britagem de 80m<sup>3</sup>/h”, à “Usinagem de brita graduada” e à “Base de brita graduada”<sup>2</sup> (Tabelas 28, 29 e 30, respectivamente), até que satisfizessem os itens necessários para a execução final da camada.

Essencialmente, o item que sofreu alteração, e refletiu nos custos das demais tabelas, foi o valor dos insumos. O qual compreende o item “Rocha para britagem com perfuratriz sobre esteira”<sup>3</sup>, encontrado nas atividades auxiliares da tabela referente à “Brita produzida em central de britagem de 80m<sup>3</sup>/h”. O valor desse item foi substituído pelo preço do agregado reciclado vendido na usina de reciclagem de RCC de Santa Maria, já que esse agregado é somente submetido à britagem primária e, por isso, seguirá os mesmos processos que a brita especificada nas tabelas do SICRO (DNIT, 2011) até a execução final. Os valores calculados nessa comparação exibiram os custos para cada metro cúbico de material executado na camada de base.

Portanto, a avaliação final consistiu em calcular os custos envolvidos na execução da camada de base das estruturas compostas por ambos os materiais quando os mesmos apresentassem equivalência nos seguintes aspectos técnicos: deflexão máxima ( $D_{máx}$ ), deformação específica ( $\epsilon_t$ ) e tensão máxima de tração ( $\sigma_v$ ). Então, calculou-se o volume de material utilizado para a camada composta de BGS e para as camadas constituídas por agregados reciclados, conforme espessura delimitada pelo Módulo de Resiliência, quando as mesmas apresentassem repostas semelhantes aos esforços. Dessa forma, procedeu-se o comparativo quantitativo dos custos entre as mesmas, a fim de demonstrar a viabilidade econômica obtida com a utilização dos agregados reciclados.

---

<sup>2</sup> Tabelas do SICRO (DNIT, 2011) sob número de referência 1 A 01 200 01, 1 A 01 395 01 e 2 S 02 230 00, respectivamente para cada processo.

<sup>3</sup> Atividade auxiliar sob número de referência 1 A 01 150 01, encontrada na tabela 1 A 01 200 01 do SICRO (DNIT, 2011) (Tabela 28).

Tabela 28 – Custos referentes à brita produzida em central de britagem de 80m³/h.

1 A 01 200 01 - Brita produzida em central de britagem de 80m³/h		Produção da Equipe: 66,00m³		(Valores em R\$)		
A - Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário
		Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
E010 - Carregadeira de Pneus - 3,3m³ (147kW)	1,00	0,24	0,76	189,85	19,62	60,48
E225 - Conjunto de Britagem - 80m³/h (276kW)	1,00	1,00	0,00	447,88	19,62	447,89
E504 - Grupo Gerador - 288KVA (230kW)	1,00	1,00	0,00	127,32	15,13	127,33
Custo Horário de Equipamentos						635,69
B - Mão de Obra	Quantidade			Salário-Hora	Custo Horário	
T512 - Encarregado de britagem	1,00			39,24	39,24	
T701 - Servente	8,00			6,11	48,88	
Custo Horário da Mão-de-Obra						88,13
Adc. M.O. - Ferramentas: (15,51%)						13,67
Custo Horário de Execução						737,49
Custo Unitário de Execução						11,17
D - Atividades Auxiliares	Quantidade	Unidade			Preço Unitário	Custo Unitário
1 A 00 963 00 - Peças de Desgaste do Britador 80m³/h	0,0152	cjh			143,79	2,19
1 A 01 150 01 - Rocha p/ britagem c/ perfur. sobre esteira	0,57	m³			23,85	13,59
Custo Total das Atividades						15,78
Custo Unitário Direto Total						26,95
Preço Unitário Total						26,95

Área hachurada: item a ser substituído.

Fonte: SICRO (DNIT, 2011).

Tabela 29 – Custos referentes à usinagem de brita graduada.

1 A 01 395 01 - Usinagem de brita graduada		Produção da Equipe: 121,00m <sup>3</sup>				(Valores em R\$)
A - Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário
		Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
E010 - Carregadeira de Pneus - 3,3m <sup>3</sup> (147kW)	1,00	0,98	0,02	189,85	19,62	186,45
E106 - Usina Misturadora - de solos 300t/h (99kW)	1,00	1,00	0,00	103,59	20,74	103,60
E503 - Grupo Gerador - 164/180KVA (144kW)	1,00	1,00	0,00	85,94	15,13	85,94
Custo Horário de Equipamentos						375,99
B - Mão de Obra	Quantidade			Salário-Hora	Custo Horário	
T501 - Encarregado de turma	1,00			22,98	22,98	
T701 - Servente	5,00			6,11	30,55	
Custo Horário da Mão-de-Obra						53,54
Adc. M.O. - Ferramentas: (15,51%)						8,30
Custo Horário de Execução						437,83
Custo Unitário de Execução						3,62
D - Atividades Auxiliares	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário	
1 A 01 200 01 - Brita produzida em central de britagem de 80m <sup>3</sup> /h	1,60	m <sup>3</sup>	26,95		43,13	
Custo Total das Atividades						43,13
Custo Unitário Direto Total						46,74
Preço Unitário Total						46,74

Área hachurada: item a ser substituído.

Fonte: SICRO (DNIT, 2011).

Tabela 30 – Custos referentes à execução de bases de brita graduada.

2 S 02 230 00 - Base de brita graduada		Produção da Equipe: 121,00m <sup>3</sup>				(Valores em R\$)
A – Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário
		Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
E102 - Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop 10,2t (82kW)	1,00	0,73	0,27	118,93	15,13	90,91
E105 - Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25t (98 kW)	1,00	0,75	0,25	101,08	15,13	79,60
E109 - Distribuidor de Agregados - autopropelido (103kW)	1,00	0,89	0,11	126,39	19,62	114,65
E404 - Caminhão Basculante - 10m <sup>3</sup> - 15t (191kW)	3,56	1,00	0,00	127,62	17,93	454,36
E407 - Caminhão Tanque - 10.000l (191kW)	1,00	0,70	0,30	125,49	17,93	93,23
Custo Horário de Equipamentos						832,75
B - Mão de Obra	Quantidade			Salário-Hora	Custo Horário	
T511 - Encarregado de pavimentação	1,00			39,24	39,24	
T701 - Servente	3,00			6,11	18,33	
Custo Horário da Mão-de-Obra						57,57
Adc. M.O. - Ferramentas: (15,51%)						8,93
Custo Horário de Execução						899,26
Custo Unitário de Execução						7,43
D - Atividades Auxiliares	Quantidade	Unidade			Preço Unitário	Custo Unitário
A 01 395 01 - Usinagem de brita graduada	1,0000	m <sup>3</sup>			46,74	46,74
Custo Total das Atividades						46,74
F - Transporte de Materiais Produzidos / Comerciais	Toneladas / Unidade de Serviço				Custo Unitário	
1 A 01 395 01 - Usinagem de brita graduada	2,4000					
Custo Unitário Direto Total						54,18
Lucro e Despesas Indiretas (27,84%)						15,08
Preço Unitário Total						69,26

Área hachurada: item a ser substituído.

Fonte: SICRO (DNIT, 2011).

## 4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Gestão dos resíduos da construção civil em Santa Maria

#### 4.1.1 Generalidades

A cidade de Santa Maria situa-se na região central do Rio Grande do Sul, aproximadamente 290 km da capital do estado, Porto Alegre (Figura 31). Sua extensão territorial é de 1.788,129Km<sup>2</sup>, com cerca de 261.031 habitantes, resultando em uma densidade demográfica de 145,98hab/km<sup>2</sup>, o que a caracteriza como cidade de médio porte (IBGE, 2011).

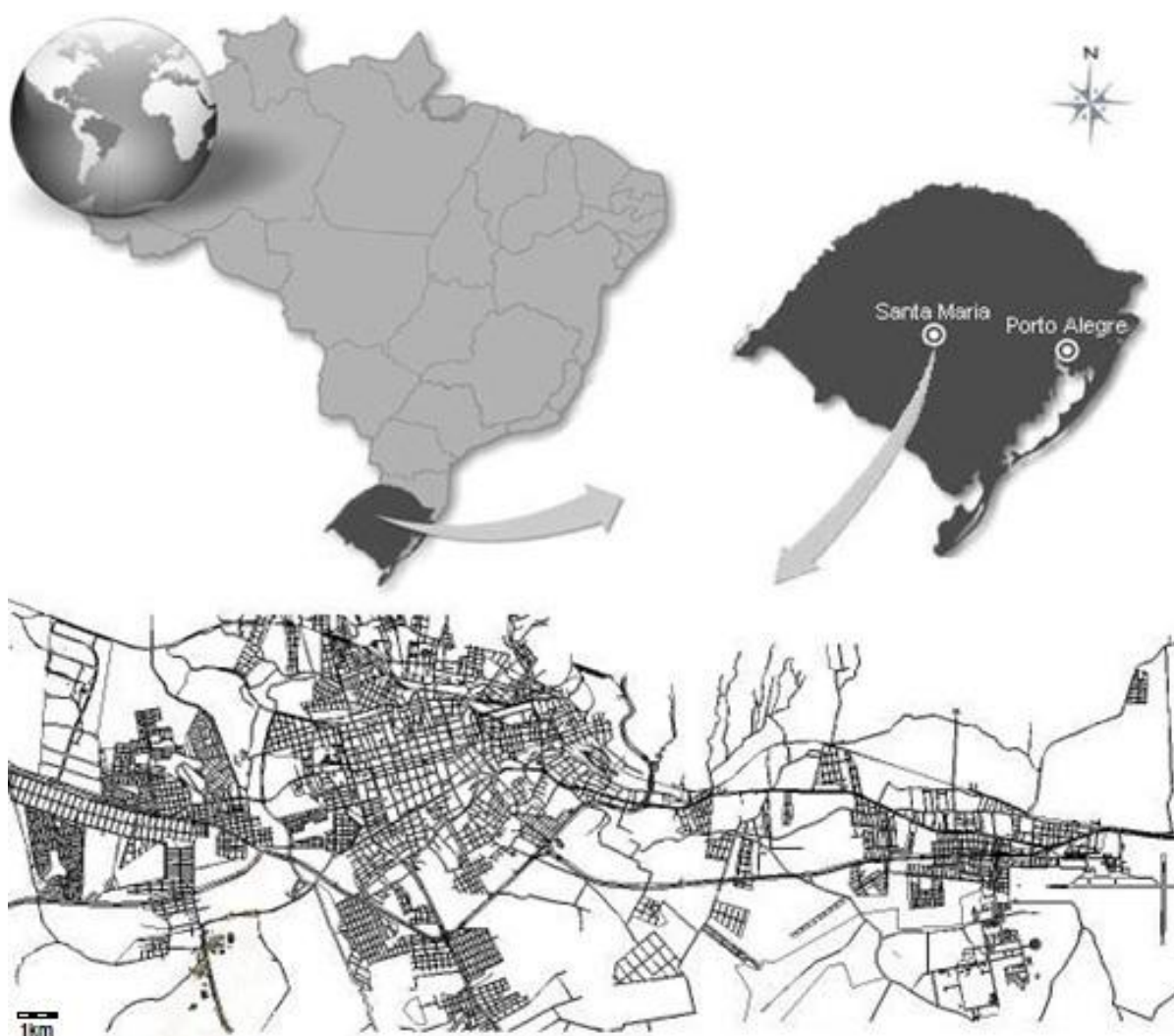


Figura 31 – Localização de Santa Maria  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

O município é considerado bastante influente economicamente por abrigar o segundo maior contingente militar do país e por possuir diversas instituições de ensino superior, o que o torna um espaço de transição. A economia está baseada no comércio e na indústria da construção civil que para suprir o contingente necessário de habitações, vai à busca de grandes volumes de matéria-prima para fabricação de componentes, ocasionando assim uma preocupação constante em relação ao consumo desenfreado e ao descarte dos resíduos.

Nesse sentido, em 2002, foi instituída a Resolução 307 (CONAMA, 2002), para fins de estabelecer diretrizes a respeito do gerenciamento e da gestão dos RCC. Um dos principais pontos citados nessa resolução refere-se ao destino final desses resíduos, onde está proposto que as municipalidades devem estabelecer diretrizes acerca dos RCC, as quais devem atender desde o programa de gerenciamento inicial, orientando os processos desde o ponto de geração nas próprias obras até o destino final, em áreas devidamente licenciadas para tal fim.

Mesmo com o advento da resolução, Santa Maria demorou a implantar um programa de gerenciamento de RCC. O reflexo dessa falta de regulamentação, segundo Piovezan (2007), era estimado em aproximadamente 3820t/mês de RCC depositados em locais impróprios até o ano de 2007, o que propiciava diversos tipos de contaminação.

#### 4.1.2 Legislação vigente

O município de Santa Maria utiliza como atributo legal o Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil de Santa Maria - PIGRCC, de 29 de outubro de 2009. O PIGRCC instituiu diretrizes que orientam a gestão dos RCC no município, onde explana que os RCC devem ser preferencialmente segregados na origem e transportados de forma diferenciada para o reaproveitamento, tratamento e destino final. O plano ainda trata como os RCC devem ser encaminhados para locais onde podem ser dispostos de forma adequada, evitando que os materiais sejam descartados em locais impróprios ou encaminhados para aterros sanitários.



O PIGRCC ainda descreve como deve ser o manejo dos resíduos, especificando diretrizes técnicas, procedimentos e demais atribuições para os geradores, transportadores e locais de recebimento dos resíduos. Na qual estabelece os critérios para obtenção das licenças prévia, de instalação, e de operação. Além disso, expõe ações de orientação, fiscalização e controle dos agentes envolvidos. Sob o mesmo enfoque, entre os fatores analisados que influenciam diretamente no sucesso do PIGRCC, destacam-se:

- a) **Planejamento:** O projeto de gerenciamento dos RCC deve ser elaborado por um corpo técnico qualificado e implantado desde o início da obra. Deve-se constar diretrizes que possibilitem a redução da quantidade de resíduos provenientes de sobras no processo construtivo, o que pode gerar economia ao construtor. Recentemente, a Lei n. 12.305 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, determina que toda obra ou processo que gera resíduos deve constar, juntamente com os projetos complementares, o projeto de gerenciamento dos RCC na obra, englobando desde a geração, tratamento, transporte e destinação final.
- b) **Treinamento dos agentes envolvidos:** Antes do início da obra devem-se qualificar os agentes envolvidos, principalmente os operários, proporcionando também fornecimento de dispositivos e acessórios para que executem as diretrizes propostas no projeto de gerenciamento e obtenham o melhor aproveitamento no processo. Um ponto importante desse treinamento é delimitar as responsabilidades que cada agente está sujeito ao efetuar (ou não) as ações designadas.
- c) **Transporte:** Os transportadores devem ser credenciados pelo órgão regulador para que possam ser fiscalizados ao movimentarem as cargas de RCC, e então destinem as mesmas em áreas de disposição regular previamente estipuladas.
- d) **Disposição final:** As áreas de disposição final devem estar regulamentadas pelo órgão competente e, conforme enquadramento normativo, oferecer o tratamento adequado ao RCC.
- e) **Fiscalização:** A fiscalização por parte dos órgãos reguladores é de fundamental importância para combater irregularidades no processo de gerenciamento. Em virtude de algumas ações serem onerosas e demandarem

tempo elevado, fator que se opõe ao orçamento que é cada vez mais limitado, torna-se bastante atrativo para alguns geradores reduzirem esses custos por intermédio de atividades ilícitas que visam o transporte e descarte irregular.

- f) **Ações educativas:** O sistema de gerenciamento não atinge sua máxima eficácia se o gerador não é consciente das suas responsabilidades. O pequeno gerador (que contribui com poucas quantidades de resíduos, proveniente de obras novas ou reformas de pequeno porte) merece maior atenção, pois ele é responsável por 75% da produção de RCC no país (PINTO, 2005), e na maioria das vezes destina seu produto de forma irregular, geralmente com o lixo doméstico. No momento em que as diretrizes são difundidas, ou seja, cada gerador é conscientizado sobre suas responsabilidades, o programa de gerenciamento melhora sua eficiência. Um exemplo dessa falta de consciência ocorre quando o pequeno gerador contrata um transportador (“caçamba de tele-entulho”), se esse transportador não apresenta um comprovante (CTR - Controle de Transporte de Resíduos) de que o material está sendo levado para um local de disposição correta, o gerador também responde pela ação, caso o mesmo seja disposto em área irregular. Em suma, o gerador é responsável por todo o ciclo de vida do resíduo, desde sua origem até o descarte final.

#### 4.1.3 Gerenciamento no município

Por meio de levantamentos realizados, constatou-se que Santa Maria possui atributos que orientam como realizar as principais ações propostas no PIGRCC. Os quais estão dispostos em um manual de auxílio ao gerenciamento dos RCC em obras, disponível no SINDUSCON da cidade desde 2010. Este manual foi elaborado por uma empresa de capital privado da região, que propõe uma metodologia baseada em ações que buscam a gestão sustentável dos RCC gerados no município, entre as quais destacam-se:

- a) Capacitar ambientalmente a indústria da construção civil de Santa Maria a realizar um manejo sustentável de seus resíduos, respeitando as diretrizes de gestão municipal, legislação federal e as normas técnicas vigentes;

- b) Subsidiar as empresas construtoras a realizarem a gestão dos RCC de forma a reduzir custos com a remoção e disposição final;
- c) Fornecer subsídios para os grandes geradores elaborarem os seus projetos de gerenciamento de resíduos da construção civil.

O plano descreve modelos de gestão que buscam a organização dos processos nas obras (Figura 32). Conciliando gestão interna e externa almeja-se uma produção mais limpa, que é um dos condicionantes para se aumentar a produção e obter economia. O plano relata os possíveis impactos ambientais causados pela indústria da construção civil, além da conceituação e classificação dos RCC, metodologias, entre outros tópicos. Como principal ferramenta de gerenciamento e planejamento ambiental, o plano traça propostas que resultam em uma gestão composta de ações sustentáveis, entre elas ressalta-se (Figura 33):

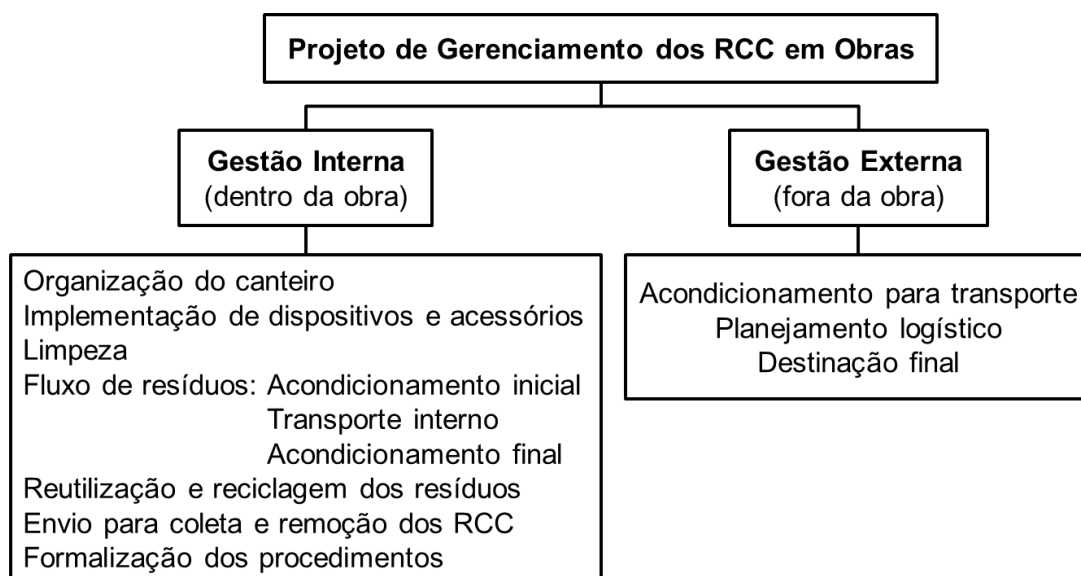


Figura 32 – Orientação para gestão dos RCC realizados em obras.  
Fonte: PIGRCC de Santa Maria (2010).

- a) **Capacitação ambiental dos agentes:** o sucesso de um programa ambiental dentro de uma organização deve estar alicerçado na compreensão dos trabalhos desenvolvidos pelos colaboradores e a importância que suas ações irão acarretar ao meio ambiente.
- b) **Planejamento do sistema de gestão ambiental:** sistema de metas desenvolvidas pelas empresas construtoras para gestão dos RCC.

- c) **Implantação e operação do sistema de gestão:** fase que inicia a implantação e operação do sistema de gestão ambiental adotado pela construtora.
- d) **Monitoramento das ações propostas:** ferramenta para avaliar se os objetivos e metas estão sendo atingidos.

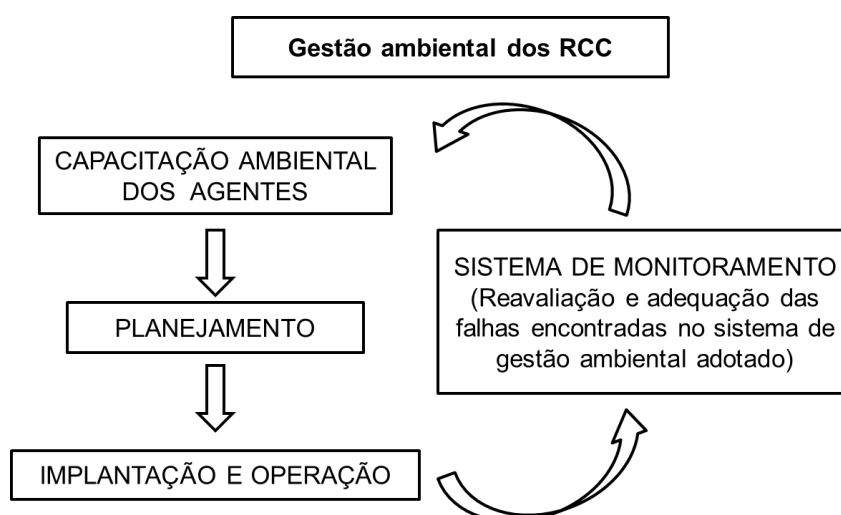


Figura 33 – Fluxograma de aplicação do planejamento de gestão ambiental  
Fonte: PIGRCC de Santa Maria (2010).

#### 4.1.4 Implantação da Área de Transbordo e Triagem

Estabelecida em Maio 2007, a Área de Transbordo e Triagem (ATT) de Santa Maria é precursora no ramo de tratamento dos RCC no estado do Rio Grande do Sul. Desde sua criação até Junho de 2008, a área somente recebia e triava os resíduos, no entanto em Julho do mesmo ano, a ATT incorporou um britador primário de mandíbulas, e assim começou a operar a usina de beneficiamento de RCC para posterior produção de agregados reciclados.

A área é de capital privado, possui cinco hectares para estocagem e processamento, situa-se na periferia da cidade a aproximadamente 4km do centro da cidade (Figura 34). Para proteger o entorno contra danos ambientais e a saúde, a ATT é resguardada por cercamento e barreiras verdes (para retenção de materiais pulverulentos provenientes do processo de britagem), além disso, há um monitoramento contínuo da superfície para evitar poluição do solo e das águas (Figura 35).



Figura 34 – Localização da ATT e da usina de reciclagem de RCC de Santa Maria.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).



Figura 35 – Ações de prevenção na ATT de Santa Maria: operários devidamente equipados com EPI e, ao fundo, cercamento e barreiras verdes para proteção da área.  
Fonte: Acervo GR2 (2010).

## 4.2 Avaliação do modelo de gestão de RCC existente em Santa Maria

### 4.2.1 Situação anterior à implantação da ATT

A avaliação demonstrou que o município possui potencialidades quanto à reciclagem dos resíduos, porém são pouco exploradas. Piovezan (2007) estimou a geração de RCC no município pela movimentação das cargas de RCC pelas empresas coletoras. O autor relata que, antes da implantação da ATT, no ano de 2007 o município possuía uma população de 242.000 habitantes e alcançava índices de geração de RCC de aproximadamente 3184 m<sup>3</sup>/mês (ou 3820 t/mês<sup>4</sup>) que eram depositados em locais irregulares, sem tratamento adequado. Esses valores resultaram em uma geração per capita de 189 kg/hab/ano. Abaixo das estimativas nacionais de geração de RCC que apresentam valores entre 230-760 kg/hab/ano (PINTO, 1999).

Embora a cidade não possuísse um local específico e licenciado para destinação final dos RCC, pelos índices nacionais pode-se notar que grande parte dos RCC da cidade não era, ao mínimo, coletada e enviada aos locais não tratados que eram ocupados pelas empresas. Essa parcela que falta para atingir o mínimo da estimativa nacional era comumente enviada a locais intitulados de “bota-fora<sup>5</sup>” ou eram misturadas ao lixo doméstico, isto é, ambos os descartes favoreciam as degradações ambientais e potencializavam as avarias a saúde pública (Figuras 36 e 37).



Figura 36 – Local de disposição clandestina (“bota-fora”).

Fonte: Acervo GR2 (2010).

<sup>4</sup> Adotando-se como massa específica para os RCC de 1200 Kg/m<sup>3</sup> (PINTO & GONZÁLES, 2005).

<sup>5</sup> Locais de disposição irregular para pequenos volumes de resíduos que, ao longo do tempo, torna-se atrativo para o descarte e, por isso, acumulam grandes volumes de RCC.



Figura 37 – Evolução da degradação ambiental causada pela disposição clandestina de RCC em local da periferia de Santa Maria, aproximadamente 80% da área foi degradada após um ano do início do descarte irregular.  
Fonte: Acervo GR2 (2010).

#### 4.2.2 Situação posterior à implantação da ATT

A partir da implantação da ATT, que ocorreu no ano de 2007, os índices demonstraram outro panorama. Segundo a Figura 38 pode-se observar que somente cerca da metade dos RCC produzidos no município era encaminhada para tratamento na ATT. No entanto, a Resolução 307 (CONAMA, 2002) e a PNRS (BRASIL, 2010) estipulam que, se a cidade possui central de tratamento de resíduos, os mesmos devem ser encaminhados a ela, não importando se é de capital público ou privado; caso haja ambas, há o livre arbítrio. Embora esses preceitos não sejam cumpridos por grande parte da população, em quatro anos de funcionamento, a ATT já tratou aproximadamente 90000 toneladas de RCC.

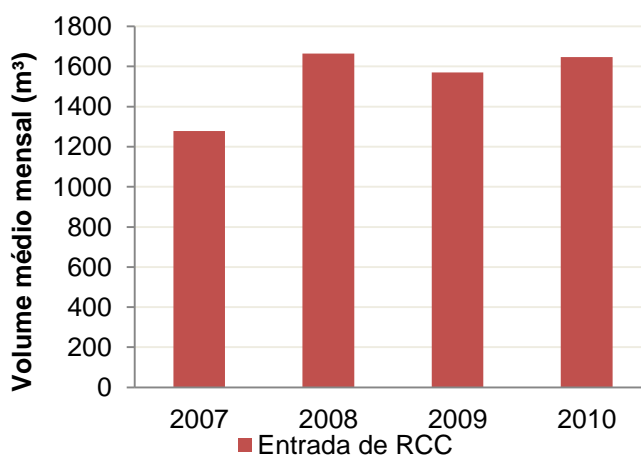


Figura 38 – Controle volumétrico dos RCC na ATT

Outro fator a ser enfatizado é que a população de Santa Maria passou para 261.000 habitantes em 2010, o que implica o aumento da geração de RCC para 3425 m<sup>3</sup>/mês (ou 4110 t/mês), se as estimativas de Piovezan (2007) persistissem. Porém, os incentivos econômicos aplicados na indústria da construção civil propiciaram o crescimento do setor e a conjunta geração de RCC.

Com o propósito de determinar a quantidade de RCC tratados durante o período de funcionamento, procurou-se avaliar quali-quantitativamente os resíduos que chegam mensalmente à ATT. Os quais demonstraram que, em 4 anos de funcionamento, a ATT de Santa Maria tratou aproximadamente 88700 toneladas de RCC, ou seja, quantia essa que deixou de contribuir para a poluição nas mais diversas formas.

Com relação às características dos RCC depositados, a Figura 39 descreve os materiais presentes nas composições, já a Figura 40 separa os mesmos agregados conforme as classes correspondentes. Conforme as ilustrações pode-se notar que quase 30% dos resíduos que chegam à ATT deveriam ir para o aterro sanitário, pois são compostos, principalmente, por rejeitos de poda e lixo doméstico. Pode-se adicionar que devido a essa composição, esses materiais dificultam o processo de triagem e contaminam os demais elementos.

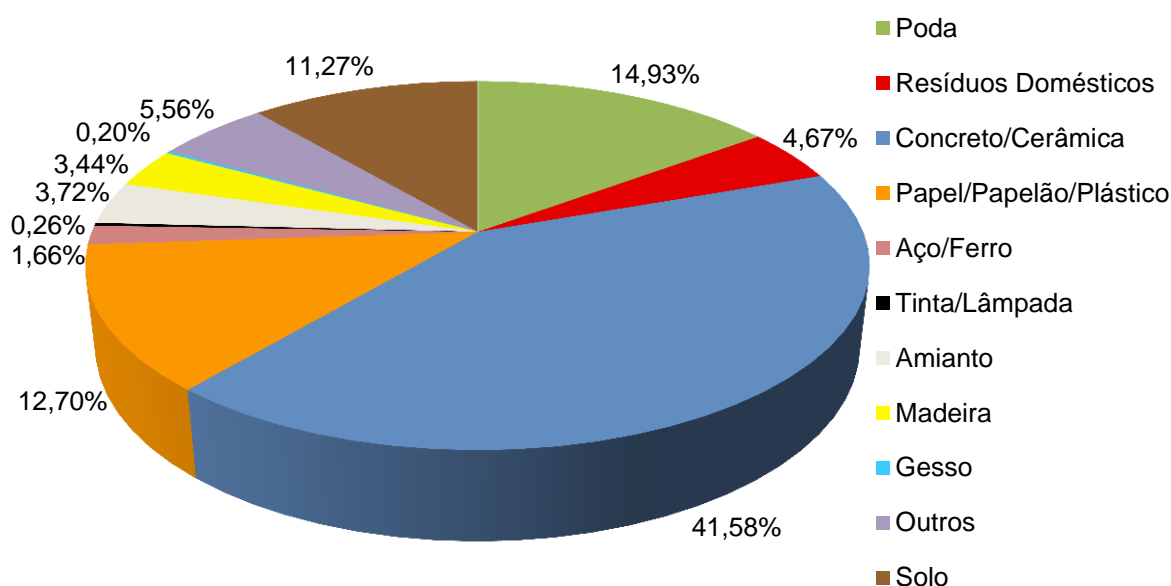


Figura 39 – Levantamento qualitativo dos resíduos que chegam à ATT em 2010.



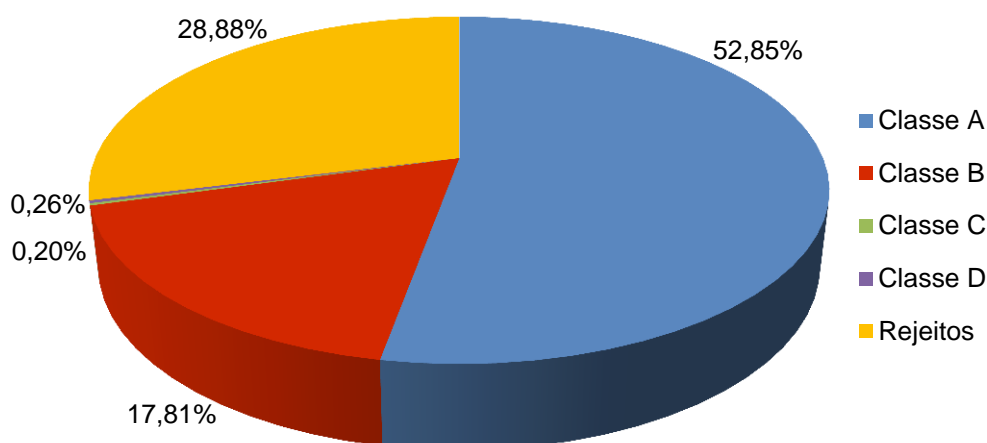


Figura 40 – Porcentagem dos resíduos que chegam à ATT separados por classe.

Embora possua local de destinação adequado, a população do município é resistente a utilizá-lo e, quando o utiliza, nem sempre contribui de maneira apropriada, por fatores como:

- a) **Desconhecimento da legislação:** Por serem pouco difundidas, a Resolução 307 (CONAMA, 2002) e a PNRS (BRASIL, 2010) não chegam ao pequeno gerador (próprios usuários dos imóveis) que, segundo Pinto (2005), são responsáveis por 75% da produção de RCC no país.
- b) **Desconhecimento dos impactos ambientais:** Como visto anteriormente, o descarte impróprio de RCC traz consigo degradações ambientais que podem ser irreparáveis. No entanto, os prejuízos desse ato não são difundidos amplamente nos meios técnico-científicos e informacionais.
- c) **Custo associado:** A remoção, o transporte e o ingresso na ATT (caso seja privada) trazem consigo um custo agregado. Buscando a redução de custos, muitos geradores buscam métodos incorretos (ou ilegais) de economizar.
- d) **Fiscalização:** Para que o sistema de gerenciamento funcione, é necessário fiscalizar as ações de todos envolvidos no processo, sejam eles geradores, transportadores, tratadores, etc. Com essa vigilância, diminuem-se as maneiras de preterir o processo, o qual tende a obter resultados satisfatórios e a se expandir.
- e) **Distinção entre os tipos de resíduo:** Ações como diferenciar os tipos de resíduos são fundamentais para o gerenciamento desses materiais. O cenário ideal seria selecioná-los conforme a composição e enviá-los ao local de

reciclagem correspondente. Porém, esse processo depreende ações educativas para instruir a população, o que é oneroso, resultando na inviabilidade econômica para tal procedimento. Entretanto, para fins de triagem, reciclagem e produção de agregados reciclados para construção civil, devem-se diferenciar rejeitos de resíduos, pois é importante que não sejam misturados no momento em que são descartados, o que acontece habitualmente na quase totalidade das cidades brasileiras que possuem coleta de RCC. Rejeitos são materiais que não podem ser reaproveitados para produção de agregados reciclados, como por exemplo: materiais que sofrem putrefação, lixo doméstico, material hospitalar, rejeitos de poda, entre outros, e devem ir para o aterro sanitário ou local de tratamento específico. Já os resíduos são sobras do processo construtivo ou produtos de demolição, potencialmente recicláveis, como descritos na classificação presente na Resolução 307 (CONAMA, 2002), logo devem ser encaminhados para aterros específicos de RCC ou, preferencialmente, para áreas que triam e reciclam os mesmos.

O reflexo do desleixo com relação ao descarte dos RCC é encontrado em todo ambiente urbano de Santa Maria. Entre os exemplos mais frequentes, destacam-se:

- a) Resíduos jogados em encostas, provocando sobrecarga, destruição da vegetação e, por conseguinte, podendo afetar a estabilidade dos taludes (Figura 41);
- b) Descarte de resíduos dentro de mananciais, prejudicando a drenagem urbana e contaminação das águas (Figura 42);
- c) Descarte em áreas de preservação ambiental como faixas de domínio das rodovias e áreas de preservação permanente (Figura 43);
- d) Caçambas de coleta sem proteção (Figura 44);
- e) Descarte em zona urbana residencial, a beira de ruas e avenidas, próximo a habitações (Figura 45);
- f) Descarte em zona urbana comercial, junto a empreendimentos (Figura 46);
- g) Sobras do processo produtivo, não removidas após o término da obra (Figura 47);

- h) Descarte em zona rural, causando degradação dos recursos naturais (Figura 48);
- i) Queima de RCC combustíveis, como derivados de papel, plástico, madeira, tintas ou solventes (Figura 49). Quando alguns desses materiais são queimados podem produzir gases poluentes, além de acelerar a contaminação do solo e das águas. O PVC e determinados tipos de plásticos são alguns exemplos de materiais que possuem propriedades tóxicas que são liberadas através da combustão;
- j) Descarte em "bota-foras", tornando-se locais atrativos para outros tipos de resíduos e para proliferação de vetores (Figura 50);
- k) Rejeitos domésticos em caçambas para transporte de RCC (Figura 51);
- l) Transporte inadequado de RCC, veículo irregular e sem proteção (Figura 52);
- m) Sobras do processo construtivo, provenientes do pequeno gerador (Figura 53);
- n) Resíduos descartados com o lixo doméstico, contaminando-os (Figura 54).



Figura 41 - RCC descartados em taludes.  
Fonte: Piovezan (2007).



Figura 42 - RCC descartados na drenagem urbana.  
Fonte: Piovezan (2007).



Figura 43 - RCC descartados em área de preservação permanente.  
Fonte: Piovezan (2007).



Figura 44 - Caçambas de coleta sem proteção.  
Fonte: Piovezan (2007).



Figura 45 - RCC descartados em zona habitacional.

Fonte: Acervo do Autor (2011).



Figura 46 - RCC descartados em zona comercial.

Fonte: Acervo do Autor (2011).



Figura 47 - Sobras de uma obra em zona urbana.

Fonte: Acervo do Autor (2011).



Figura 48 - Descarte de RCC em zona rural.

Fonte: Acervo do Autor (2011).



Figura 49 - Queima de RCC combustíveis.

Fonte: Piovezan (2007).



Figura 50 - Descarte em "bota-fora".

Fonte: Acervo do Autor (2011).



Figura 51 - Caçamba carregada de lixo doméstico.

Fonte: Acervo do Autor (2011).



Figura 52 - Transporte inadequado de entulho.

Fonte: Acervo do Autor (2011).



Figura 53 – Sobras do processo construtivo provenientes do pequeno gerador.  
Fonte: Acervo GR2 (2011).



Figura 54 – Resíduo proveniente de reforma, descartado juntamente com o lixo doméstico.  
Fonte: Acervo GR2 (2010).

Mesmo que a cidade possua local para recebimento e tratamento de RCC, a não utilização do mesmo contribui para ocasionar os exemplos relatados acima, os quais colaboram para chamada gestão corretiva (denominada por PINTO, 1999). Levantamentos realizados nos locais dos agravos demonstraram que, quando esses são removidos, as soluções são puramente emergenciais, ou seja, tratam-se de medidas não preventivas que propiciam atividades repetitivas e custosas, isto é, apenas deslocam-se os RCC para outros locais não licenciados, sem que os mesmos sejam tratados adequadamente.

Essas medidas geram degradações ainda maiores, pois os locais onde foram removidos permanecem com resquícios de entulho, os quais são compostos por diversas classes, entre elas as contaminantes, o que afeta diretamente a superfície onde foram locados e, por conseguinte, a nova área onde serão depositados. Em outras palavras, a cada remoção incorreta, gera-se outro ponto de contaminação.

Sob esse prospecto, os levantamentos realizados até o ano de 2011 descreveram 37 pontos de descarte clandestino de RCC no perímetro urbano do município. Desse total, a Figura 55 retrata 24 locais onde a grande maioria é composta por locais intitulados de “bota-fora”, alimentados, principalmente, pelo pequeno gerador ou por transportadores que não depositam cargas na ATT. Já a Figura 56 demonstra outros 13 locais onde, com a ajuda de fotos de satélite, pode-se comprovar a degradação que os RCC causaram ao meio ambiente. É possível notar que os locais mais utilizados para o descarte irregular são as áreas de periferia, a beira de vias e próximo ao limite urbano do município.

O resultado de todo esse desleixo colabora para chamada Gestão Corretiva que, como exemplificado na Tabela 08, utiliza ações não sustentáveis que resultam

em um custo aproximado de 70% a mais que a metodologia proposta pela Gestão Diferenciada. Além disso, essa gestão causa efeitos prejudiciais, como:

- a) **Impactos ambientais:** como já denominados, são causados pela disposição incorreta do resíduo em locais inapropriados, clandestinos ou lixões. As propriedades de alguns componentes geram contaminação da superfície, devastando a vegetação e contaminando o solo e as águas.
- b) **Danos à saúde pública:** com a destinação incorreta dos resíduos, o local torna-se atrativo para a proliferação de vetores transmissores de doenças, como insetos, ratos, etc.
- c) **Impactos visuais:** entulho jogado em via pública denigre a paisagem e, por consequência, a imagem da cidade, o que desagrade a qualquer cidadão.

#### 4.2.3 Implantação da usina de reciclagem de RCC de Santa Maria

Com o propósito de diminuir as pilhas de RCC descartadas, em Janeiro de 2008 implantou-se um britador primário no pátio de operações da ATT (Figura 57). Essa inserção agregou mais um processo ao tratamento dos RCC: a reciclagem. Entretanto, por dificuldades técnicas, somente em Julho do mesmo ano deu-se início a produção de agregados reciclados de RCC no município.

Desde que entrou em operação, a usina enfrenta dificuldades para produção de agregados reciclados que são comuns a maioria das usinas de beneficiamento do país, principalmente em função da variabilidade na composição dos RCC. As Figuras 39 e 40 demonstram que aproximadamente 52% do material que chega a ATT é potencialmente reciclável, isto é, compostos de materiais classificados como Classe A, segundo a Resolução 307 (CONAMA, 2002).

Segundo dados coletados na ATT, admite-se uma entrada de 97t/dia de RCC, porém somente 52% é passível de reciclagem, assim tem-se uma quantidade de 51t/dia de material aptos para processar. Como a capacidade produtiva do britador é limitada em cerca de 15t/dia (450t/mês), tal índice implica que a quantia a ser beneficiada diariamente oscila em aproximadamente 30% dos agregados suscetíveis ao processo, já os 70% restantes são estocados para futuro beneficiamento.

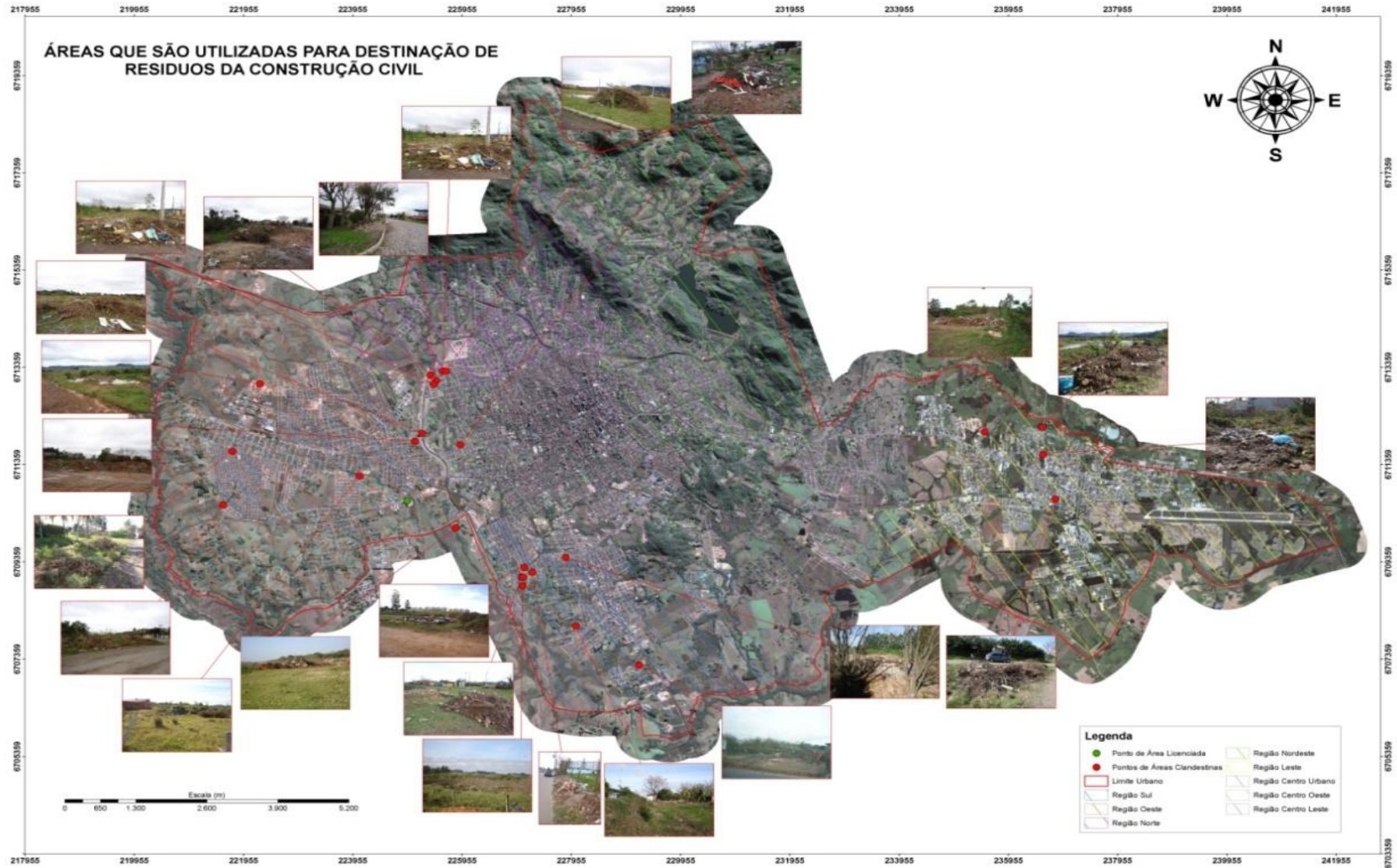


Figura 55 – Áreas de disposição final de RCC em Santa Maria: locais licenciados e clandestinos.  
 Fonte: Acervo GR2 (2011).

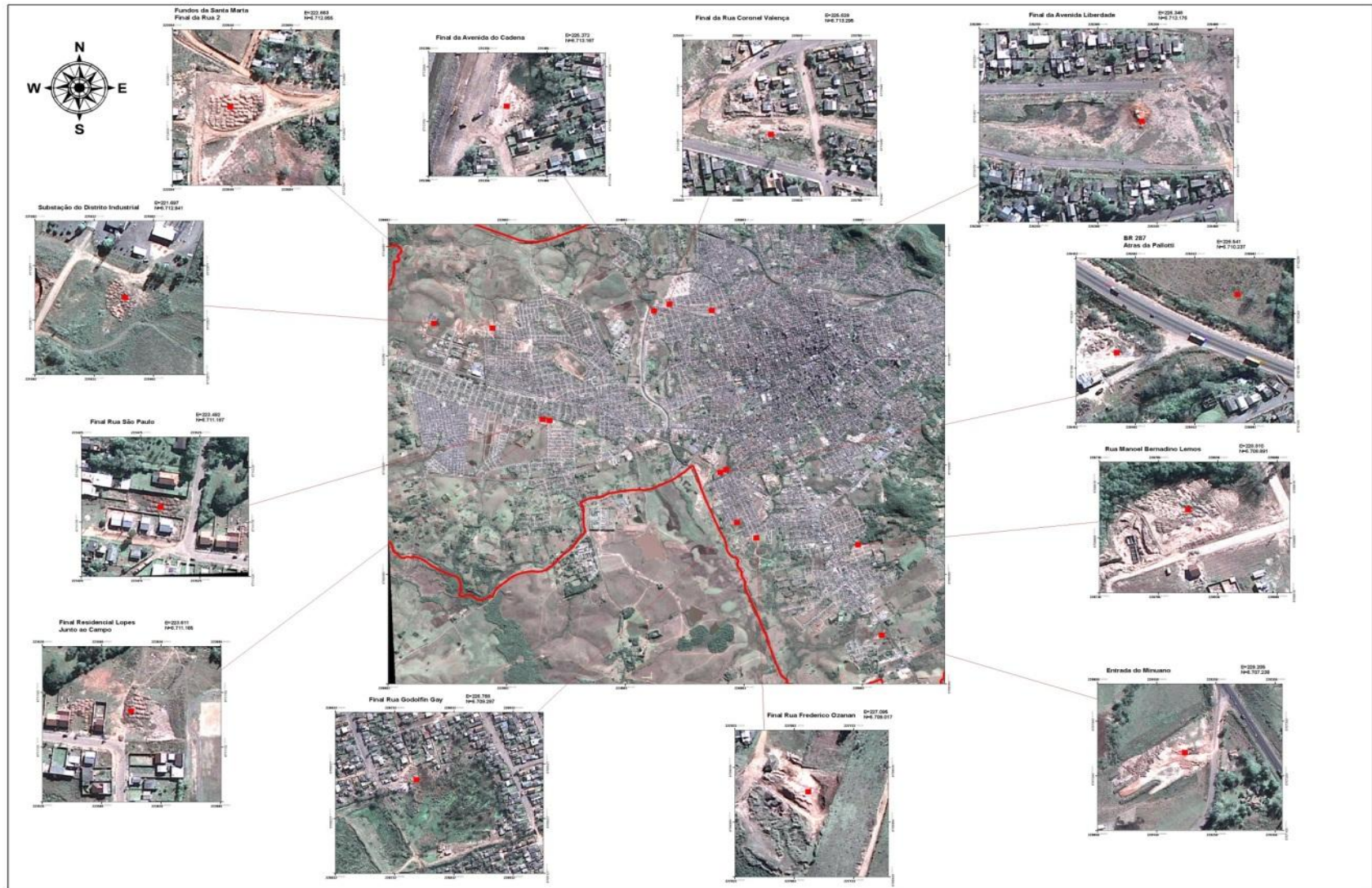


Figura 56 – Áreas de disposição final de RCC em Santa Maria: degradação ocasionada pelo descarte incorreto de RCC em alguns pontos da cidade. Fonte: Acervo GR2 (2011).





Figura 57 – Vista panorâmica da área de transbordo e triagem de Santa Maria.  
Fonte: Acervo do Autor (2010).

Buscando o máximo de eficiência no aproveitamento dos agregados passíveis de reciclagem, a usina adota um cuidadoso planejamento no processo de britagem, o qual define a qualidade do produto final. Para isso, os processos de operação da usina envolvem as seguintes diretrizes:

- a) Os resíduos chegam à usina por meio de empresas que transportam os RCC, os quais são acomodados em local determinado (Figura 58);
- b) Após, é realizada uma avaliação visual para determinar se a carga pode ingressar na ATT. Se não for aceita, no caso de rejeitos ou materiais não provenientes de RCC, a carga é remetida ao local de origem (Figura 59 e 60). Se aceita, é realizada uma triagem manual para retirada de impurezas, contaminantes e distinção entre materiais que possam ou não ser reciclados (Figura 61);
- c) Os resíduos de classe B, C, D (não recicláveis como agregados), são segregados conforme respectiva classe e, por meio de parcerias, são acondicionados separadamente e enviados a empresas de reciclagem ou destinação final correspondes (Figura 62);
- d) Os resíduos de classe A que passam na triagem são conduzidos ao beneficiamento, composto por um britador primário de mandíbulas (Figura 63);
- e) Já no britador, para melhora da qualidade dos agregados, há uma segunda triagem manual na esteira de alimentação, no qual um operário retira impurezas menores que não foram possíveis de serem separadas anteriormente (Figura 64);
- f) Após o processo de britagem, os agregados reciclados saem com diâmetro máximo delimitado pela abertura das mandíbulas. Posteriormente, são armazenados e disponibilizados para comercialização (Figura 65).



Figura 58 – Recebimento das cargas.  
Fonte: Acervo do Autor (2010).



Figura 59 – Carga aceita para tratamento.  
Fonte: Acervo do Autor (2010).



Figura 60 – Carga rejeitada para tratamento (no detalhe, lixo hospitalar).  
Fonte: Acervo do Autor (2010).



Figura 61 – Triagem manual para separação do agregado Classe A.  
Fonte: Acervo GR2 (2011).



Figura 62 – Acondicionamento de resíduos de outras classes não passíveis de beneficiamento.  
Fonte: Acervo do Autor (2010).



Figura 63 – Beneficiamento do resíduo de Classe A.  
Fonte: Acervo GR2 (2011).



Figura 64 – Retirada de contaminantes menores na esteira de alimentação.  
Fonte: Acervo GR2 (2011).



Figura 65 – Agregado reciclado disponível para comercialização.  
Fonte: Acervo do Autor (2010).

No início da produção, ainda que custasse em média 35% do valor do agregado natural proveniente de pedreiras, o agregado reciclado não obteve a aprovação desejada mesmo para a utilização mais simples, por exemplo, como material de aterro. Tal rejeição era propiciada por fatores como:

- a) Desconhecimento das características técnicas;
- b) Desconhecimento de casos de sucesso;
- c) Incertezas quanto ao comportamento;
- d) Bibliografia insuficiente a respeito do tema;
- e) Produção em pequena escala.

A partir da divulgação das potencialidades do uso desses agregados, e também pela difusão informal de casos em que seu emprego apresentou sucesso, em 2008 o mercado de Santa Maria começou a utilizá-lo. Conforme a Figura 66, pode-se observar que após três anos disponível no mercado, a saída de agregados reciclados aumentou linearmente, alcançando patamares que culminam na venda da quase totalidade do material beneficiado.

Os índices apresentados acima demonstram que o agregado reciclado está se consolidando no mercado da santa-mariense, mesmo que na sua versão funcional mais simples. Compradores relataram que o agregado reciclado é principalmente destinado a empregos que não requerem controle tecnológico rigoroso, como material de preenchimento e revestimento primário (“cascalhamento”) de vias rurais.

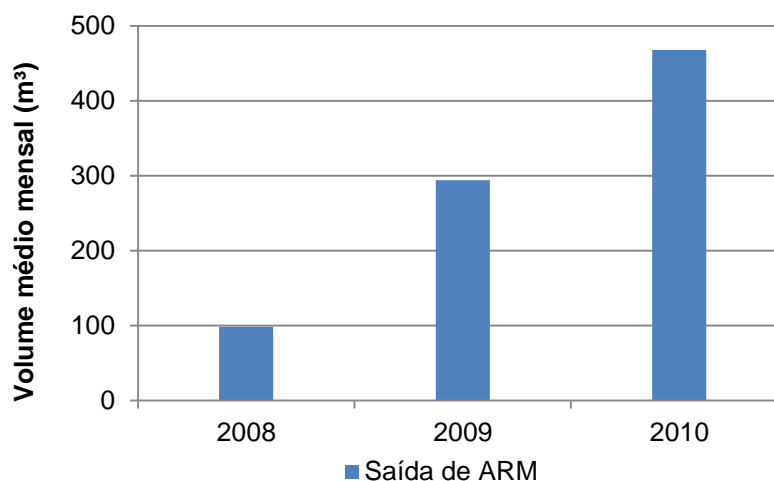


Figura 66 – Controle volumétrico dos agregados reciclados na ATT.

#### 4.2.4 Situação atual

Apesar dos inúmeros benefícios ambientais e econômicos proporcionados pela ATT e pela sua usina de reciclagem a população de Santa Maria, os dados demonstram que os problemas apresentados após a implantação da ATT continuam. Esses acontecimentos advêm de uma sucessão de vários fatores, entre os quais destacam-se a pseudo-economia que um descarte clandestino proporciona e a preterição dos órgãos responsáveis pela fiscalização.

A população não cumpre a legislação existente, o que é considerado chave para garantir o funcionamento dos programas de gerenciamento. O não cumprimento das ações determinadas no PIGRCC, e também na PNRS (BRASIL, 2010), por todos os agentes envolvidos (geradores, transportadores, fiscalizadores, etc.) compromete o sucesso da gestão de resíduos na cidade. No momento em que cada agente desempenhar as determinações que lhes competem, as ações começam a apresentar êxito e o programa atinge suas necessidades.

A fiscalização por parte do órgão responsável - no caso de Santa Maria, a prefeitura - é essencial para o bom funcionamento e desempenho do programa de gerenciamento de resíduos, fazendo que este alcance seus objetivos. No entanto, verifica-se que esta fiscalização é falha, pois nenhum agente foi encontrado trabalhando para o sistema de coleta do município, o que decorre ao não cumprimento das tarefas do programa.

Sabe-se que o processo de fiscalização das ações propostas no PIGRCC denota tempo e alto custo envolvido, porém o sucesso das ações depende de todas as partes envolvidas, se uma for vigiada as demais tenderão a funcionar corretamente. Por exemplo: o transportador é o principal elo entre os geradores e a área de destinação final, se o mesmo for fiscalizado, as probabilidades de disposição em áreas irregulares diminuem, e da mesma forma ele cobrará dos geradores e da área de destinação as medidas a eles competentes, pois o controle de transporte de resíduos (CTR) registra todas as ações. Por conseguinte, para que esse controle funcione e atenda as medidas propostas, os agentes tem que trabalhar em conjunto (Figura 67).

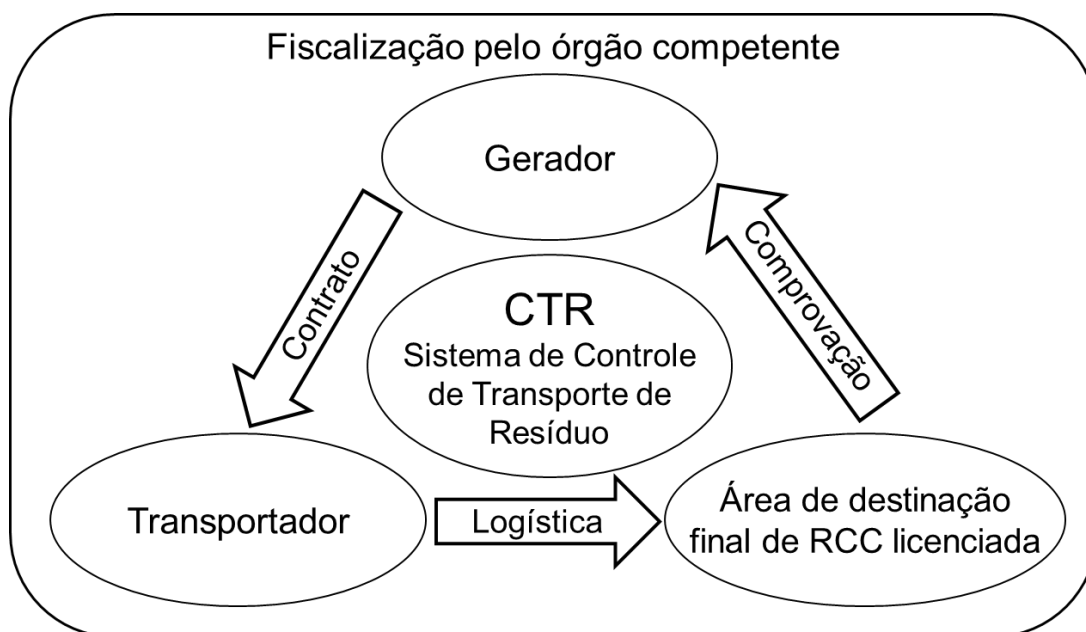


Figura 67 – Interligação entre os agentes envolvidos.

A criação de pontos de entrega voluntária (PEV) para pequenos geradores facilitaria a disposição e a fiscalização pelos agentes, além disso, diminuiria os locais de descarte clandestino (Figura 68). A distinção entre o pequeno e o grande gerador é imprescindível para disposição correta dos RCC. Para o pequeno gerador, que descarta até 3,5m<sup>3</sup> resíduos por obra e é responsável por 75% dos RCC produzidos (PINTO, 2005), as ações para destinação final (coleta, transporte e disposição em área licenciada) se tornam custosas, sendo atrativo para esse gerador a disposição em áreas de “bota-fora”. Por isso, a criação de PEV na cidade se tornaria em uma rede legalizada de atração para pequenas quantidades e, como resultado,

contribuiria para não proliferação de locais de destinação clandestina, como já demonstrado nas Figuras 55 e 56.



Figura 68 – Exemplo de Ponto de Entrega Voluntária (PEV): (a) caçambas para o descarte de RCC, (b) baias para descarte de resíduos volumosos, (c) identificação e descrição dos resíduos permitidos. Fonte: Prefeitura Municipal de Guarulhos-SP.

No entanto, nenhuma das medidas relatadas acima surtirá efeito se antes não forem tomadas algumas medidas educativas. Grande parte dos pequenos geradores generaliza o termo “entulho”, por isso, devido a sua capacidade, as caçambas coletoras de RCC se tornam atrativas para rejeitos volumosos das mais variadas formas. A grande maioria desses rejeitos deveria ir para o aterro sanitário ou local específico determinado, porém como ocupam grandes volumes não podem (ou não devem) ser removidos pelos coletores de RSU. Como necessitam de fretamento para tal fim, utilizam as caçambas coletoras de RCC na tentativa de economizar ao descartar desses materiais.

Entretanto, caso esse rejeito chegue à ATT, pode prejudicar todos os processos de tratamento, pois não se ajusta ou não é suscetível aos procedimentos de triagem, e quando podem ser reciclados, utilizam alta tecnologia que não estão disponíveis nas áreas de tratamento e reciclagem de RCC (Figura 69 e 70). Assim, ações educativas poderiam esclarecer quais materiais devem ser descartados nas caçambas coletoras e os procedimentos que o gerador deve se submeter para

destinar corretamente os resíduos, isso beneficiaria todos os processos supracitados e diminuiria o índice de cargas contaminadas por outros materiais que não fossem RCC.



Figura 69 – Rejeito doméstico disposto em caçambas coletoras de RCC.  
Fonte: Acervo GR2 (2011).



Figura 70 – Rejeito industrial disposto em caçambas coletoras de RCC.  
Fonte: Acervo GR2 (2011).

Os correntes problemas apresentados pelo gerenciamento dos RCC em Santa Maria contribuem negativamente não só para os processos de tratamento e destinação final, como também para a produção de agregados reciclados. Embora a saída desse material esteja em crescimento linear nos últimos anos, é provável que nos próximos a usina não alcance números tão mais elevados que 2010. Isso ocorre em função da produtividade diária limitada do britador, mas principalmente da grande quantidade de materiais impróprios (classes B, C, D e rejeitos) para reciclagem que são encaminhados à ATT e dos resíduos próprios para reciclagem (classe A) que, em razão de serem descartados de forma irregular, não chegam à ATT.

#### 4.2.5 Propostas para melhoramento do sistema de gerenciamento de RCC

Uma parceria entre instituições privadas do município, apoiada por órgãos públicos, associações e sindicatos, elaborou um *site* que visa reunir problemas, ideias e ações que estão acontecendo em Santa Maria e disponibilizá-las para conhecimento de toda a população na rede mundial de computadores. O site possui o nome de *Nossa Santa Maria*, e pode ser acessado através do endereço eletrônico

“[www.nossasm.com.br](http://www.nossasm.com.br)”, trata-se de uma proposta a ser aprimorada em longo prazo e ficou disponível no segundo semestre de 2011.

Desde que foi lançado, o *site* agrega denúncias, reclamações, notícias, projetos desenvolvidos, entre outras considerações que podem ser apresentadas pela própria população de Santa Maria. As informações são inseridas em um mapa do município (Figura 71), de forma a facilitar a localização das deficiências, as quais estão divididas pelas seguintes áreas: cidadania, meio ambiente, cultura, saúde, educação, segurança, esportes, trânsito, lazer e bem-estar, e urbanismo.

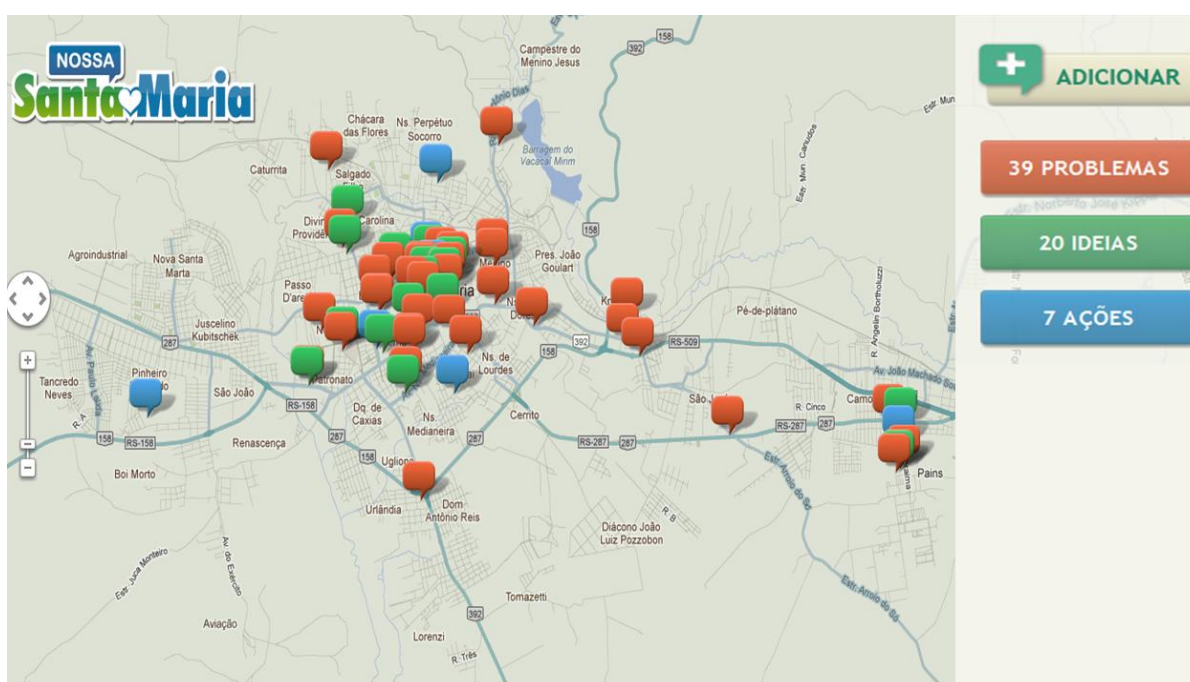


Figura 71 – Interface gráfica do usuário no *site*.  
Fonte: *Site Nossa Santa Maria* (2011).

No que se refere à área de meio ambiente, essa iniciativa já detectou inúmeros impactos ambientais causados pela falta de saneamento básico, devastação e descarte ilegal de RSU, entre os quais alguns foram causados pela disposição incorreta de RCC. Após o recebimento das informações pode-se averiguar e buscar soluções para esses problemas, sem a necessidade de reivindicações formais que, ao tramitar, denotam tempo e maior custo até serem solucionadas.

Já na área de trânsito, que também agrega questões referentes à pavimentação, estão disponíveis reclamações provenientes da inexistência de



revestimento primário, principalmente em vias da periferia, as quais poderiam ser resolvidas com o emprego de agregados reciclados.

Após a difusão e consolidação dessa primeira fase do projeto, futuramente a etapa a ser implantada para a área de meio ambiente consiste em monitorar todos os tipos de coletores e transportadores de RSU licenciados. Dessa forma, pode-se combater o descarte clandestino, pois a cada transportador será provido banco de dados contendo as respectivas rotas utilizadas desde a coleta até a disposição final. Caso esse não vá para a área de disposição licenciada, os trajetos e locais de descarte serão relatados no seu histórico. Assim, se o projeto adquirir viabilidade, as medidas referentes ao monitoramento servirão como um grande auxílio à fiscalização das ações propostas no PIGRCC.

### **4.3 Caracterização do agregado beneficiado**

#### **4.3.1 Análise granulométrica**

A granulometria do agregado é uma das características que asseguram estabilidade aos pavimentos, isso ocorre em função atrito interno obtido pelo entrosamento das partículas. Dessa forma, buscou-se conhecer a distribuição granulométrica dos agregados provenientes da usina de beneficiamento de Santa Maria para analisar a possibilidade do seu emprego em pavimentação.

Com o propósito de determinar se haveria distinção na composição e granulometria dos agregados reciclados, foram ensaiadas três amostras provenientes das coletas realizadas em períodos e estações distintas. Durante o ano de 2009 realizaram-se duas coletas, em Abril e Outubro; já em 2011, apenas uma em Fevereiro.

Os resultados demonstraram que a distribuição granulométrica não apresentou variação significativa perante as diferentes coletas (Figura 72). O diâmetro máximo não apresentou variação, delimitando-se em 50mm, tal invariabilidade era esperada, pois é possível regular sua dimensão no próprio britador. A distribuição granulométrica dos agregados obteve em média 75% do seu diâmetro maior que 2mm, assemelhando-se ao tamanho de pedregulhos. Já o

agregado miúdo, apresentou 25% do diâmetro compreendido entre 0,06m e 2mm, faixa que envolve as areias média e grossa. Entretanto, ressalta-se que há uma pequena descontinuidade entre 1mm e 4mm, tal fato exige a adequação da granulometria para utilização em pavimentação, pois a maneira com que se apresenta a distribuição granulométrica torna o material sensível à segregação.

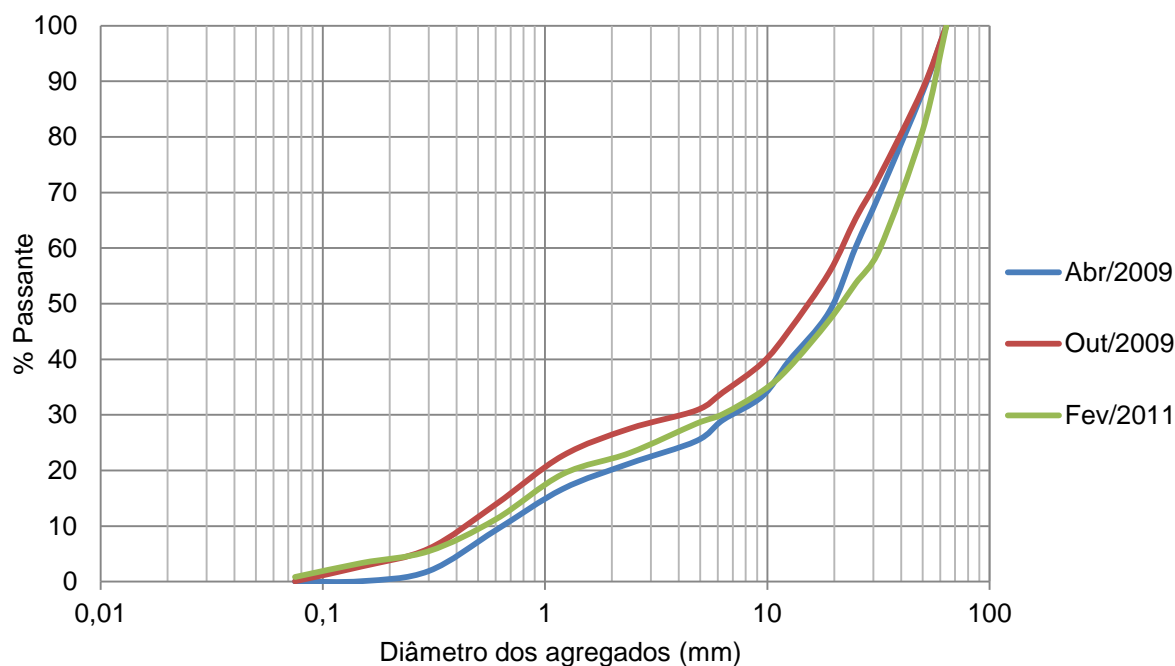


Figura 72 – Distribuição granulométrica das amostras de agregado reciclado.

Conforme a Tabela 31, que demonstra os parâmetros das curvas granulométricas apresentadas acima, é possível notar que todas as curvas granulométricas são desuniformes e relativamente bem graduadas. No entanto, a quantidade de material pulverulento, passante na peneira 0,075mm é praticamente inexistente, não chegando a 1%. Assim, para fins de nomenclatura em seções posteriores, agregados miúdos serão os passantes na peneira 4,8mm, já os graúdos serão todas as partículas retidas na mesma peneira ou de diâmetro superior.

Tabela 31 – Parâmetros das curvas granulométricas

Coleta	Diâmetro efetivo (D10) (mm)	Coefficiente de Uniformidade (Cu)	Coefficiente de Curvatura (Cc)
Abril/09	0,65	38,46	3,02
Outubro/09	0,45	48,89	2,05
Fevereiro/11	0,55	60,00	2,33

#### 4.3.2 Composição dos agregados reciclados

Juntamente com a realização da análise granulométrica, foi obtida a composição dos agregados reciclados graúdos conforme a peneira que o mesmo era retido. Ao utilizar o processo de catação, buscou-se separar os agregados conforme as classes A, B, C e D. Porém, como descrito no item 4.2.3, espera-se que o processo de triagem alcance máxima eficiência, não possibilitando outras classes que senão o beneficiamento de resíduos de classe A.

A Figura 73 exibe a média das três amostragens, na qual observa-se que em torno de 97% da composição dos agregados reciclados são provenientes de resíduos classe A. Já os outros 3% são divididos entre resíduos classe B ou C, onde encontrou-se pequenas partículas de ferro, vidro e madeira, além de fragmentos de gesso. Não foi constatado nenhum derivado de resíduos de classe D, rejeitos, resíduos domésticos ou industriais. Portanto, os índices apresentados acima estão de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004) (Tabela 19), que estipula que os materiais contaminantes não devem passar de 3%.

Com relação ao agregado Classe A presente nas amostras, sua composição média variou em torno de 51% derivados de cerâmica e 49% derivados de cimento. A partir da análise visual e tátil dos agregados miúdos, os quais não foram triados por inexecutabilidade técnica, notou-se poucos materiais que não eram provenientes de resíduos de classe A. Observou-se também que as peneiras de menor diâmetro (0,075mm a 0,6mm) e o fundo possuíam diversos tipos de solos retidos.

#### 4.3.3 Abrasividade

A realização desse ensaio é importante para verificar o desgaste físico sofrido pelo agregado quando transportado ou na passagem de compactadores. Deste modo, a Tabela 32 apresenta a abrasividade sofrida pelo agregado, visto que foram realizados dois ensaios, o primeiro com a mistura dos agregados coletados em Abril

e Outubro de 2009 (AM-2009<sup>6</sup>), e o outro com o material proveniente de Fevereiro de 2011 (AM-2011<sup>7</sup>).

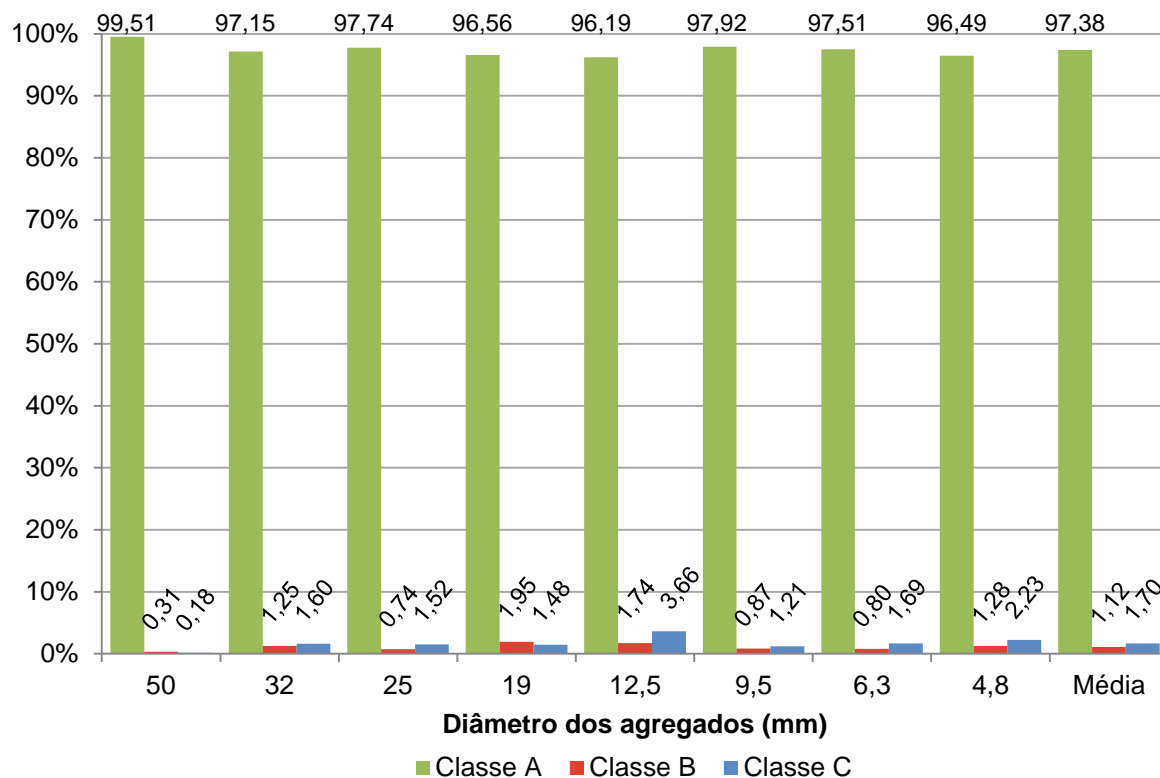


Figura 73 – Composição média das três amostras coletadas.

Ambas as amostras apresentaram resultados muito próximos, em torno de 48%, considerado elevado para utilização em pavimentos (Figura 74). No entanto, satisfazem a NBR 11804 e DNIT 141-ES (DNIT, 2010) que delimitam o limite máximo de 55% para materiais utilizados em sub-base e base de pavimentos estabilizados granulometricamente.

Essa alta abrasividade pôde ser notado antes da realização do ensaio; pois, durante a análise granulométrica, a agitação das peneiras ocasionava várias vezes a fragmentação das partículas. Acrescenta-se que a baixa resistência à abrasão auxiliou no preenchimento dos vazios das amostras quando submetidas à compactação, como será demonstrado no item 4.4.3.

<sup>6</sup> Por possuírem características semelhantes, como granulometria e composição, os agregados coletados em Abril e Outubro de 2009 foram misturados para a realização dos ensaios físicos, químicos e mecânicos. Assim, para facilitar o entendimento e a visualização, de agora em diante a mistura desses materiais será transformado em uma amostra será denominada "AM-2009".

<sup>7</sup> Do mesmo modo, os agregados coletados em Fevereiro de 2011 serão denominados de "AM-2011".

Tabela 32 – Resultados dos ensaios de abrasão “Los Angeles”.

<b>Amostra</b>	<b>Abrasividade (%)</b>
AM-2009	48,05
AM-2011	48,84
Média	48,45



Figura 74 – Ensaio de abrasão “Los Angeles”, (a) agregados antes e (b) depois da realização do ensaio.

Fonte: Acervo do Autor (2010).

#### 4.3.4 Durabilidade

Esse ensaio buscou analisar o comportamento dos agregados reciclados na presença de soluções de sulfato (sais). Dessa forma, possibilitou-se estimar a decomposição que o material aplicado nas diferentes camadas do pavimento sofreria na presença de agentes químicos.

Os resultados apontados na Tabela 33 demonstraram uma perda total média de 10,85% entre as duas amostras, o que comprova uma boa durabilidade frente às intempéries. Os materiais que mais sofreram deterioração foram os derivados de cimento (argamassados) de maior tamanho que possuíam alta porosidade e, por consequência, maior aderência aos sais, fraturando com maior facilidade nessas regiões (Figura 75).

Tabela 33 – Resultados do ensaio de durabilidade.

Amostra	Peneiras		Perda (%)	Perda total (%)
	Passante (mm)	Retido (mm)		
AM-2009	38	19	9,17	10,60
	19	9,5	0,41	
	9,5	4,8	1,02	
AM-2011	38	19	6,10	11,09
	19	9,5	4,12	
	9,5	4,8	0,87	
			Média:	10,85

Segundo especificações do DER-SP para materiais utilizados em sub-base ou base estabilizados granulometricamente, a realização do ensaio com emprego de sulfato de sódio limita as perdas em 20%, o qual também é estipulado pela NBR 11806, que estabelece os critérios para base e sub-base de brita graduada. Portanto, quanto à durabilidade, os agregados reciclados mostraram-se aptos a utilização nessas camadas.

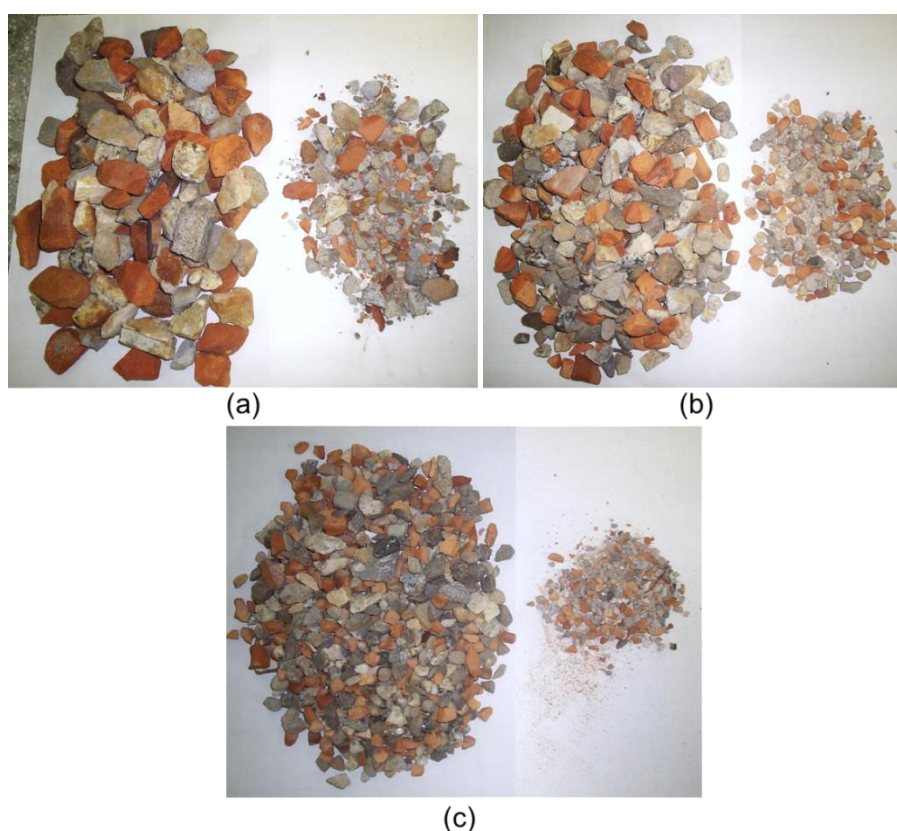


Figura 75 – Agregados após o ensaio de durabilidade. Material retido e perdido no processo conforme o diâmetro das peneiras: (a) 19mm, (b) 9,5mm e (c) 4,8mm.

Fonte: Acervo do Autor (2011).

#### 4.4 Adequação dos agregados reciclados para uso em pavimentação

Com o objetivo de aprimorar a utilização dos RCC em pavimentação, a pesquisa buscou relatar o comportamento dos agregados reciclados a serem utilizados em camadas de pavimentos seguindo as normas rodoviárias para materiais granulares. Dessa forma, almeja-se produzir literatura técnica para comparar o comportamento dos agregados reciclados em substituição as britas graduadas.

##### 4.4.1 Composições granulométricas

Para propiciar o enquadramento nas faixas de materiais granulares presentes na norma rodoviária DNIT 141-ES (DNIT, 2010), realizou-se a separação dos agregados conforme alguns tamanhos comerciais de britas presentes na região. Os agregados coletados no ano de 2009 foram misturados e tiveram sua fração graúda dividida em agregados de 2", 3/4" e 3/8", já a fração passante na peneira 4,8mm composta pelo peneiramento e foi submetida a uma britagem em laboratório para obtenção que se adeque a essa peneira, denominado "Nº4".

Da mesma forma, os agregados coletados em 2011 tiveram a fração graúda dividida nos mesmos diâmetros que os coletados em 2009; porém, para analisar uma possível mudança de comportamento, a fração passante na peneira 4,8mm foi britada duas vezes para obtenção de material ainda mais fino, denominado de "Nº4 Rebritado".

Tanto os agregados coletados em 2009, quanto os de 2011 não apresentaram variação significativa na distribuição granulométrica da fração graúda, sendo representados pelas mesmas curvas, conforme diâmetro correspondente (Figuras 76 e 77). Assim, além da possibilidade de adequação nas faixas expostas na norma DNIT 141-ES (DNIT 2010), pode-se adequar o material para aplicação em pavimentos segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004), onde descreve que o teor de material passante na peneira de 0,42mm deve ficar entre 10% e 40%.

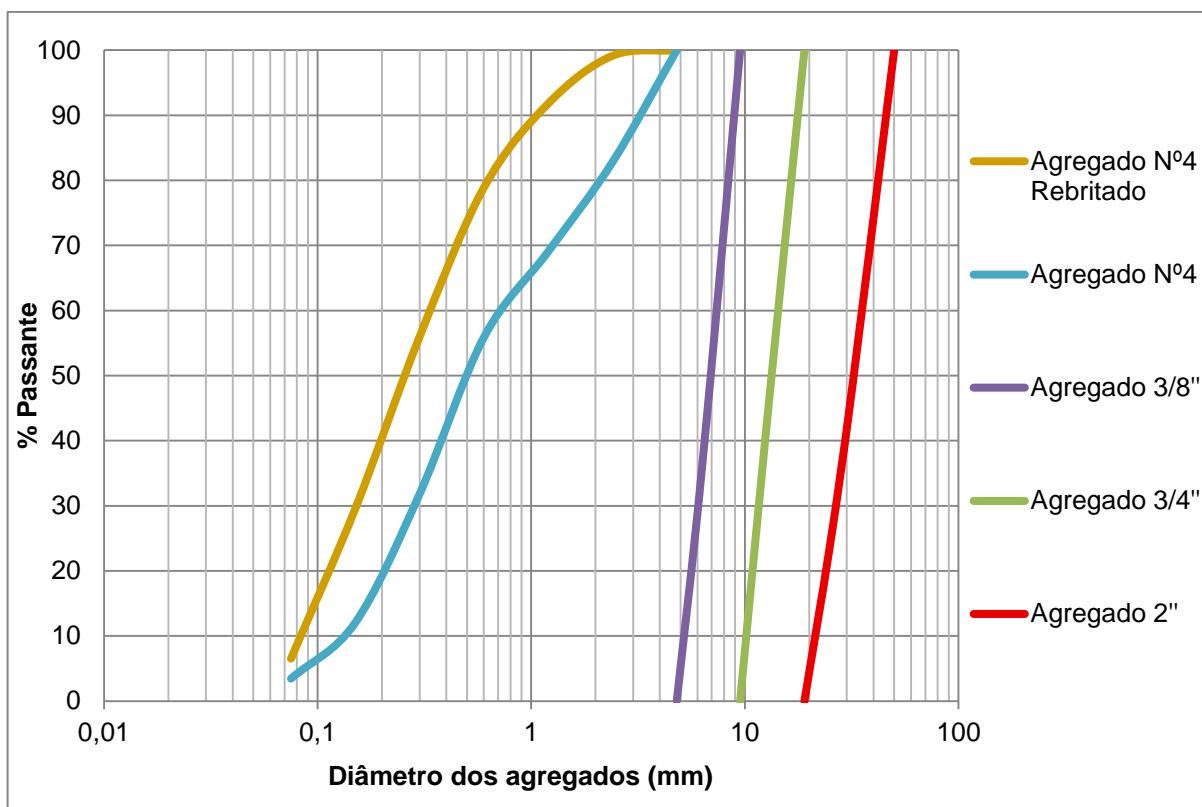


Figura 76 – Distribuição granulométrica das composições.

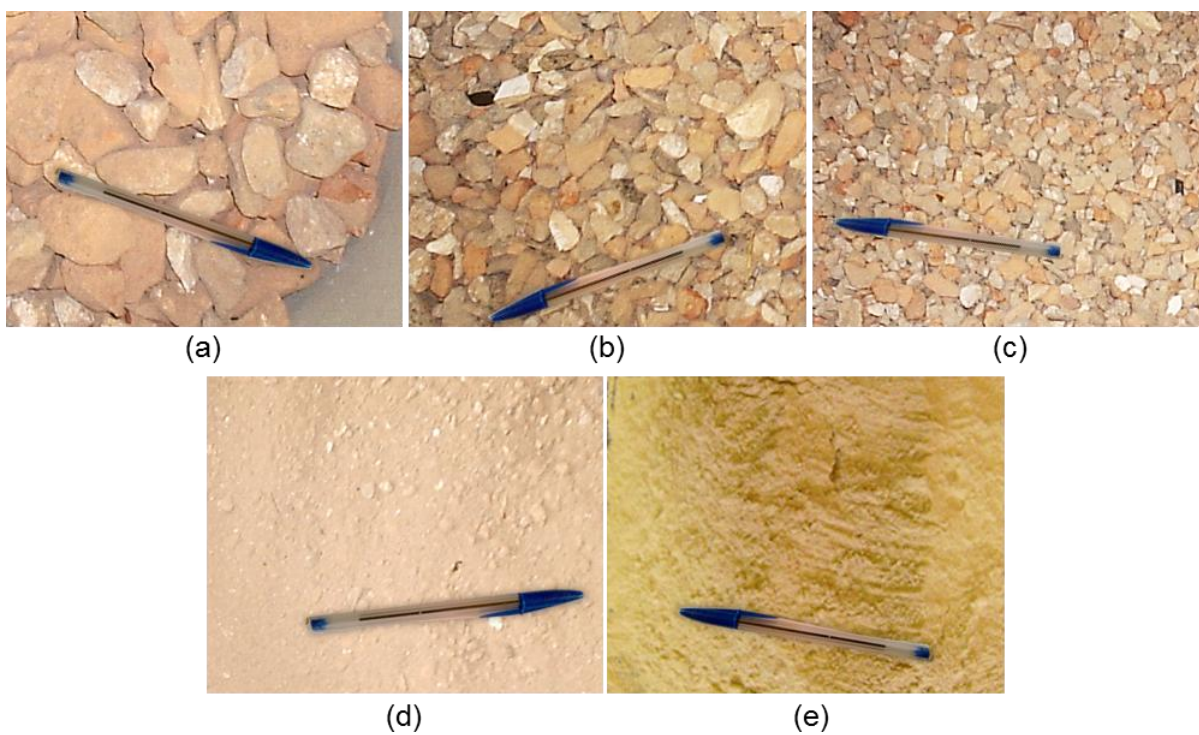


Figura 77 – Composições granulométricas: (a) 2", (b) 3/4", (c) 3/8", (d) N°4 e (e) N°4 Rebitado.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).



#### 4.4.1.1 Massa específica

A absorção do material é de fundamental importância para expansibilidade do agregado, assim como influencia no grau de compactação. Essas propriedades refletem na estabilidade e resistência do conjunto. Por isso, as amostras ensaiadas foram divididas conforme o tamanho das composições e, como demonstrado na Tabela 34, apresentaram pequena dispersão nos resultados. Tal circunstância é propiciada pela variabilidade característica dos agregados reciclados. Mesmo que nas coletas os agregados reciclados apresentem composições semelhantes, constituídos por proporções similares de resíduos, a matéria-prima utilizada na confecção desses materiais pode variar, o que implica diretamente o comportamento dessemelhante.

Como era esperado, quanto menor for o tamanho do agregado reciclado, maior a superfície específica e, por conseguinte, a massa específica. O mesmo acontece com a absorção, que obteve valores elevados, em torno de 12%; porém dentro dos limites frequentemente encontrados na literatura (apresentados no item 2.11), que variam entre 4% e 15% para agregados mistos.

Tabela 34 – Absorção e massa específica das composições.

<b>Amostra</b>	<b>Composição</b>	<b>Massa específica na condição seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção (%)</b>
AM-2009	2"	1,83	2,39	12,32
	3/4"	1,92	2,50	12,34
	3/8"	1,93	2,55	12,77
	Nº4	2,55	2,67	-
AM-2011	2"	1,90	2,34	10,04
	3/4"	1,85	2,30	10,44
	3/8"	1,80	2,36	13,28
	Nº4 Rebritado	2,49	2,78	-

#### 4.4.2 Enquadramento das composições nas faixas normativas

A norma rodoviária DNIT 141–ES (DNIT, 2010) designa 6 faixas de material granular, conforme capacidade de tráfego (Tabela 27). A partir desta especificação definiram-se as percentagens das composições granulométricas que melhor se adequaram a essas faixas pelo método das tentativas, utilizando planilha eletrônica (Tabela 35).

A Figura 78 demonstra como ficaram enquadradas as composições nas faixas granulométricas. Segundo a mesma pode-se notar que os arranjos que utilizaram agregado N°4 Rebitado (compostos por agregados reciclados provenientes de AM-2011) ficaram mais bem enquadrados nas faixas, por possuírem maior quantidade de finos. Dessa forma, os esses arranjos apresentaram-se fora dos limites em pequenas quantidades apenas nos diâmetros iguais ou inferiores a 0,15mm.

Já os arranjos que utilizaram agregados de N°4 (compostos por agregados reciclados derivados de AM-2009) apresentaram maior parcela fora dos limites, não permanecendo em diâmetros iguais ou inferiores a 0,42mm na maioria dos casos. No entanto, essas amostras exibiram maior harmonia, ou seja, os arranjos permaneceram mais próximos do eixo central relativo aos limites; além disso, não apresentaram grandes oscilações como os arranjos constituídos com agregados de N°4 Rebitado.

Tabela 35 – Dosagem das composições granulométricas conforme faixa especificada.

Faixa (DNIT 141/2010 - ES)	Amostra (Denominação)	Composição (%)				
		Agregado				
		2"	3/4"	3/8"	N°4	N°4 Rebitado
A	FA-2009	30	20	20	30	
	FA-2011	30	20	23		27
B	FB-2009	20	20	20	40	
	FB-2011	20	20	20		40
C	FC-2009		30	20	50	
	FC-2011		30	30		40
D	FD-2009		10	20	70	
	FD-2011		15	30		55
E	FE-2009			20	80	
	FE-2011			35		65
F	FF-2009				100	
	FF-2011			20		80

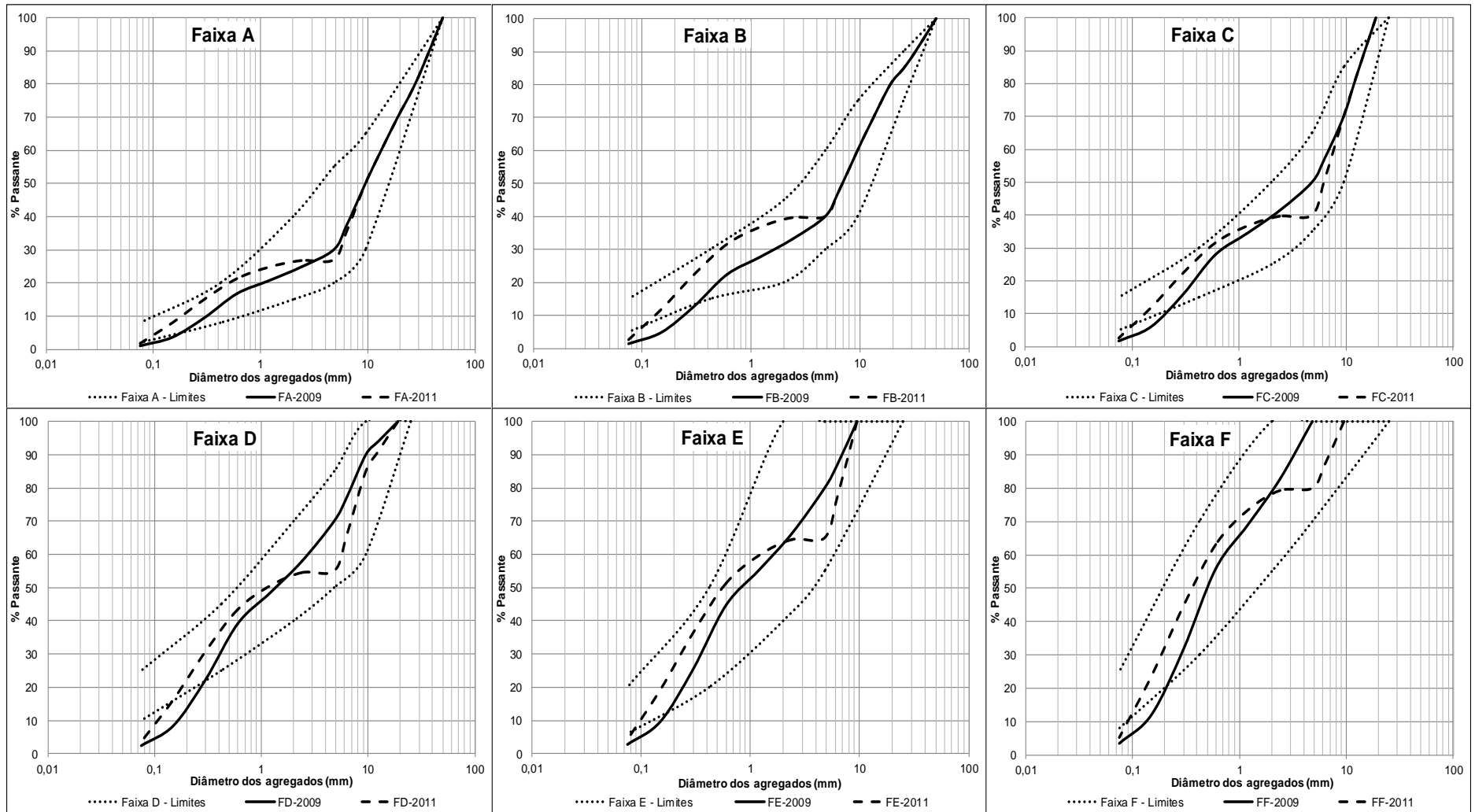


Figura 78 – Enquadramento das composições granulométricas conforme as faixas delimitadas na norma rodoviária DNIT 141-ES (DNIT, 2010).

Vale ressaltar que o método utilizado para o arranjo das composições não é o ideal, pois se os mesmos fossem elaborados por proporções que pudessem utilizar agregados pertencentes a todas as peneiras da série normal ou intermediária, poder-se-ia proporcionar uma melhor distribuição granulométrica aos arranjos, procurando obter uma curva que constituísse a média entre os limites das faixas. Entretanto, esse processo necessita de maior tempo, o que tornaria o trabalho inviável em função do período limitado para ensaios e da grande quantidade de amostras utilizadas para realização desses.

#### 4.4.3 Compactação

A realização do ensaio de compactação teve por objetivo reduzir o volume de vazios entre os agregados reciclados, dessa forma procura-se melhorar a estabilidade e, por consequência, a resistência do conjunto.

Visto que cada faixa apresentou granulometria pertinente resultada pelas composições que lhe deram origem, optou-se por analisar o comportamento dos arranjos que contemplaram três faixas de projeto distintas, conforme distribuição granulométrica correspondente ao volume de tráfego, as quais são: Faixa A (tráfego pesado, material mais grosseiro), Faixa C (tráfego pesado, material mais fino) e Faixa E (tráfego leve). Além disso, foram ensaiados dois lotes para cada arranjo presente, resultando em 4 ensaios por energia em cada faixa. Essa medida buscou verificar uma acentuada variação nos resultados, decorrente da grande variabilidade dos materiais presentes nas composições granulométricas, assim como pela diversidade de matéria-prima de que provêm os constituintes dos RCC.

As Figuras 79, 80 e 81 mostram os resultados dos ensaios abrangendo as energias normal e intermediária conforme as faixas A, C e E, respectivamente. Já a Tabela 33 apresenta os resultados da massa específica seca máxima das amostras e suas umidades correspondentes. Em todas as faixas é possível notar que com o aumento do grau de compactação, há o aumento da massa específica e também a diminuição na umidade ótima.

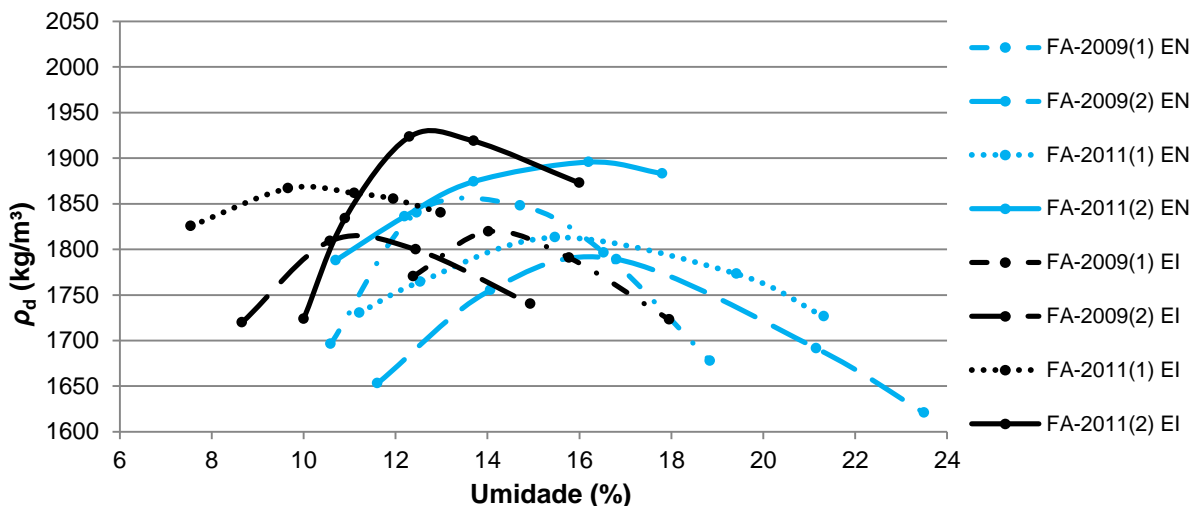
A partir da Figura 82 pode-se observar que, por apresentar granulometria mais grosseira, as amostras compactadas na faixa A necessitaram de menor teor de água para atingir a umidade ótima, o que influenciou negativamente na

trabalhabilidade das amostras e colaborou para alto índice de vazios deixado entre as partículas. Isso implicou diretamente na massa específica seca máxima, pois os resultados dessa faixa, tanto para energia normal, quanto para intermediária, apresentaram os valores médios menores dentre todas as amostras ensaiadas correspondentes à energia de compactação adotada.

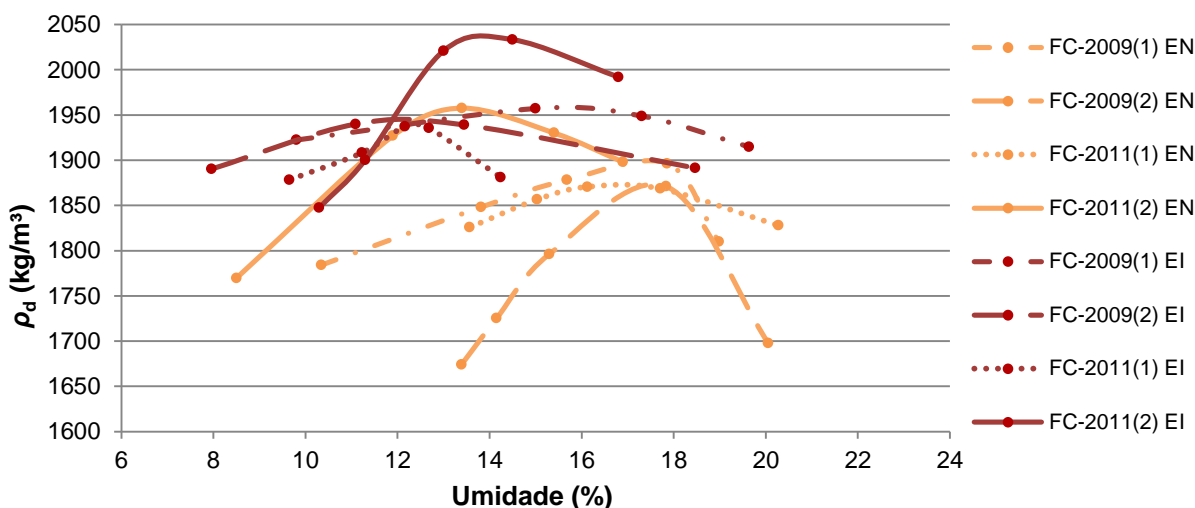
As amostras provenientes das faixas C e E compactadas na energia intermediária obtiveram os maiores valores para a massa específica seca máxima, isso se deve a quantidade de material fino presente nas amostras que melhorou a trabalhabilidade e, considerando-se a faixa C, preencheu melhor os vazios deixados pelos agregados graúdos. Em função da granulometria maioritariamente miúda, a faixa E teve seu comportamento assimilado ao de um solo siltoso; dessa forma, necessitou de maior teor de água para alcançar a massa específica seca máxima e, por conseguinte, a umidade ótima. Além disso, por conter limites que predominam granulometria mais fina, a faixa E apresentou a melhor coesão entre as partículas dentre todas as ensaiadas.

Com relação à energia de compactação, as amostras pertencentes às faixas A e C não sofreram mudança significativa no comportamento, ou seja, não apresentaram grande sensibilidade com o aumento da energia de compactação. Conforme a Tabela 36 pode-se observar que as variações para a massa específica seca entre as amostras compactadas nos mesmos lotes chegam ao máximo em 3% e 3,8%, respectivamente. Entretanto, nas mesmas condições, a faixa E apresentou maior variação com a mudança de energia, alcançando o índice máximo de 6,6%.

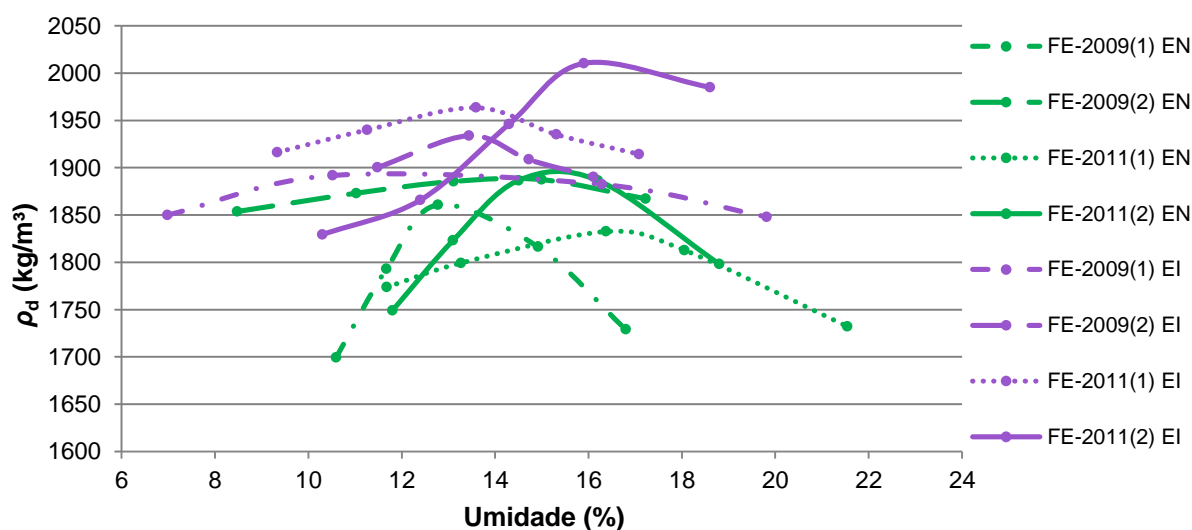
Analogamente, a Tabela 37 expõe as variações entre as máximas e mínimas das faixas conforme energia de compactação semelhante, demonstrando as pequenas variações que ocorreram por consequência da variabilidade dos materiais e, principalmente, pela diferença da granulometria das frações finas (Nº4 e Nº4 Rebritado). As amostras que utilizaram a composição Nº4 Rebritado (mais fina) apresentaram maior massa específica seca das demais que utilizaram Nº4. As amostras da faixa A que utilizaram Nº4 Rebritado alcançaram valores em média 3,9% e 4,3% maiores que as demais que utilizaram Nº4, respectivamente para energia normal e intermediária. Da mesma forma, para a faixa C as variações alcançaram 2,8% e 2,7%; e para faixa E, 1% e 2,6%. A umidade ótima também varia conforme aumenta-se a finura da composição miúda, alcançando porcentagens maiores para as composições que utilizaram agregado Nº4 Rebritado.



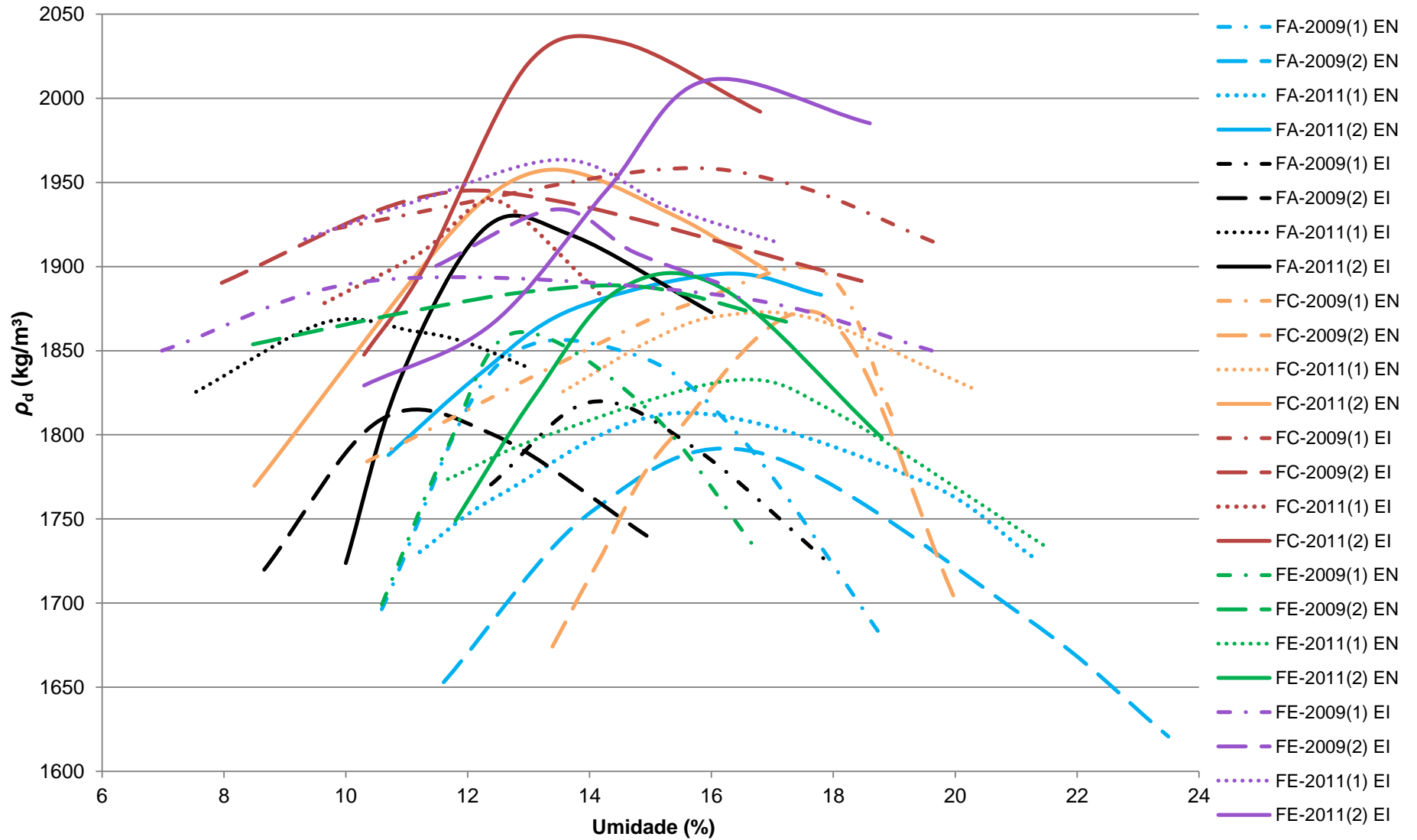
\*As siglas “EN” e “EI” referem-se à Energia Normal e Energia Intermediária, respectivamente.  
 Figura 79 – Curvas de compactação referentes às amostras da “Faixa A”.



\*As siglas “EN” e “EI” referem-se à Energia Normal e Energia Intermediária, respectivamente.  
 Figura 80 – Curvas de compactação referentes às amostras da “Faixa C”.



\*As siglas “EN” e “EI” referem-se à Energia Normal e Energia Intermediária, respectivamente.  
 Figura 81 – Curvas de compactação referentes às amostras da “Faixa E”.



\*As siglas "EN" e "EI" referem-se à Energia Normal e Energia Intermediária, respectivamente.  
 Figura 82 – Curvas de compactação contemplando todas as faixas e energias.

Tabela 36 – Resultados do ensaio de compactação.

<b>Faixa</b>	<b>Energia</b>	<b>Amostra</b>	<b><math>\rho_d</math> máx (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade (%)</b>
A	Normal	FA-2009(1) EN	1857	13,6
		FA-2009(2) EN	1792	16,3
		FA-2011(1) EN	1813	15,7
		FA-2011(2) EN	1897	16,4
	Intermediária	FA-2009(1) EI	1821	14,2
		FA-2009(2) EI	1815	11,1
		FA-2011(1) EI	1869	10,1
		FA-2011(2) EI	1931	12,8
C	Normal	FC-2009(1) EN	1901	17,7
		FC-2009(2) EN	1875	17,6
		FC-2011(1) EN	1874	16,8
		FC-2011(2) EN	1958	13,4
	Intermediária	FC-2009(1) EI	1960	15,7
		FC-2009(2) EI	1946	12,2
		FC-2011(1) EI	1940	12,4
		FC-2011(2) EI	2036	13,8
E	Normal	FE-2009(1) EN	1861	12,8
		FE-2009(2) EN	1888	14,4
		FE-2011(1) EN	1835	16,6
		FE-2011(2) EN	1897	15,4
	Intermediária	FE-2009(1) EI	1894	11,7
		FE-2009(2) EI	1935	13,5
		FE-2011(1) EI	1965	13,6
		FE-2011(2) EI	2012	16,2

Os resultados também descrevem que, independentemente de grau de compactação utilizado, dentro da faixa A os valores variaram, no máximo, 7,2% e 6,3%, respectivamente para a massa específica seca máxima e umidade de compactação das amostras. Sob o mesmo enfoque, para a faixa C as variações alcançaram 7,9% e 5,5%; e para faixa E, 8,8% e 4,9%, respectivamente. Na maioria das vezes, as amostras compactadas em 2011, que utilizaram a composição N° 4 Rebritado, obtiveram maiores valores de massa específica seca máxima.



Tabela 37 – Variação entre máximos e mínimos resultantes do ensaio de compactação conforme faixa granulométrica e energia aplicada.

<b>Faixa</b>	<b>Energia</b>	<b><math>\rho_d</math> máx (%)</b>	<b>Umidade (%)</b>
A	Normal	5,5	2,8
	Intermediária	6,0	4,1
C	Normal	4,3	4,3
	Intermediária	4,7	3,5
E	Normal	3,2	3,8
	Intermediária	5,8	4,5

Para melhor visualização, a Figura 83 demonstra as curvas de compactação com os valores médios dos agregados comumente utilizados em pavimentação, a partir dela foi inserido o intervalo que compreende a massa específica seca máxima e correspondente umidade ótima de todas as amostras compactadas. Pode-se observar que a área que o intervalo compreende no gráfico localiza-se entre as frações de silte e areia. Esses resultados devem-se a constituição que da origem aos materiais predominantes nos agregados reciclados (derivados de cerâmica e cimento), mas também pela distribuição granulométrica dos agregados presentes nas faixas.

Ao considerarmos todas as amostras utilizadas e correspondentes energias de compactação aplicadas, observa-se que o intervalo compreende variações que podem chegar a 12% para a massa específica seca máxima e 7,6% para umidade ótima.

#### 4.4.4 Variação granulométrica

Para estimar a o comportamento dos agregados reciclados após a passagem de compactadores na pista, procedeu-se com o monitoramento da granulometria antes e após a execução da compactação nas amostras provenientes do primeiro lote de AM-2011 das faixas A, C e E nas energias normal e intermediária, são elas: FA-2011(2) EN, FA-2011(2) EI, FC-2011(2) EN, FC-2011(2) EI, FE-2011(2) EN e FE-2011(2) EI.

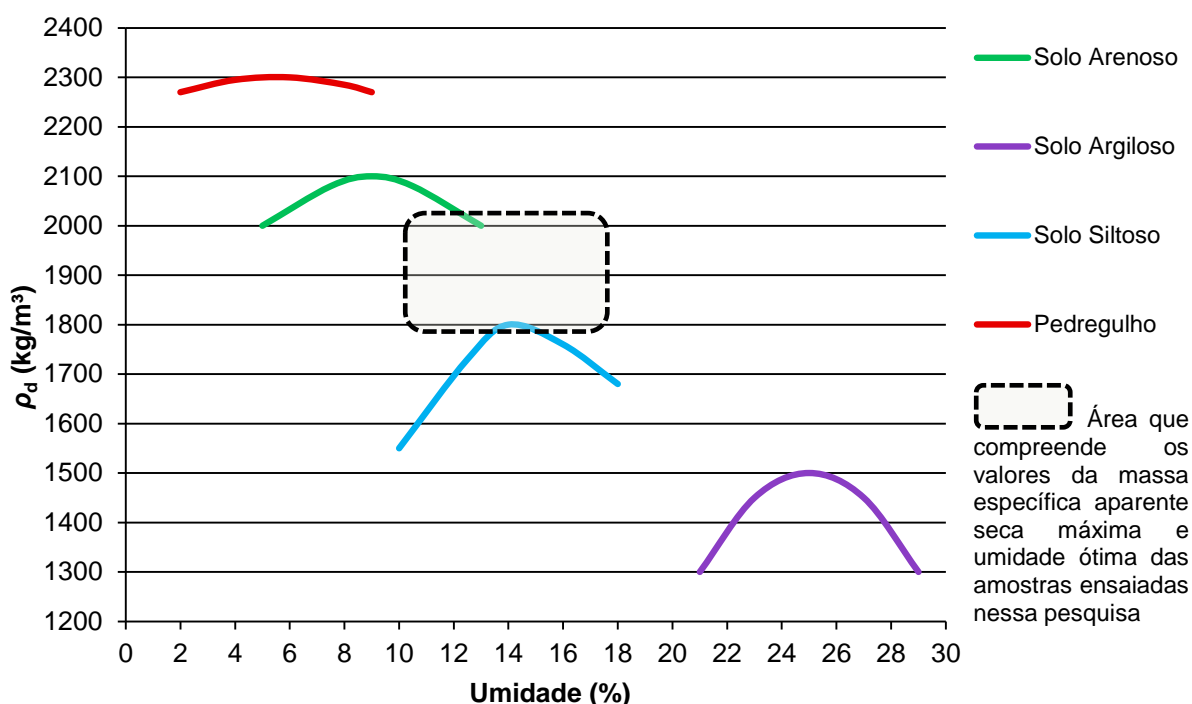


Figura 83 – Valores médios dos materiais comumente utilizados em pavimentação quando submetidos ao ensaio de compactação.  
Fonte: Adaptado de Ricardo & Catalani (1990).

As Figuras 84, 85 e 86 ilustram a variação granulométrica apresentada pelas amostras. Por apresentar limites que compreendem na sua maioria granulometria gráuda, a faixa A obteve o maior índice quanto à diminuição no tamanho das partículas. Os índices apontaram uma degradação de 7% para energia normal e 11% para intermediária, esses valores implicaram o aumento da porcentagem de agregados finos (material passante na peneira 4,75mm) em até 9% na energia normal e 13% na intermediária.

Da mesma forma, a faixa C obteve índices de degradação de 5% e 9% para as energias normal e intermediária, respectivamente. Porém a faixa E, constituída por agregados predominantemente miúdos, obteve os menores índices, chegando a 4% e 5%, respectivamente para as energias normal e intermediária.

Os resultados encontrados descrevem que a energia intermediária possui um potencial de degradação maior que a normal. Para a faixa A, essa degradação foi cerca de 57% maior, para a faixa C esse valor compreendeu 80% e para a faixa E correspondeu a 25%. Portanto, quanto maior a quantidade de agregado gráudo presente na composição, maior será a degradação sofrida pela compactação.

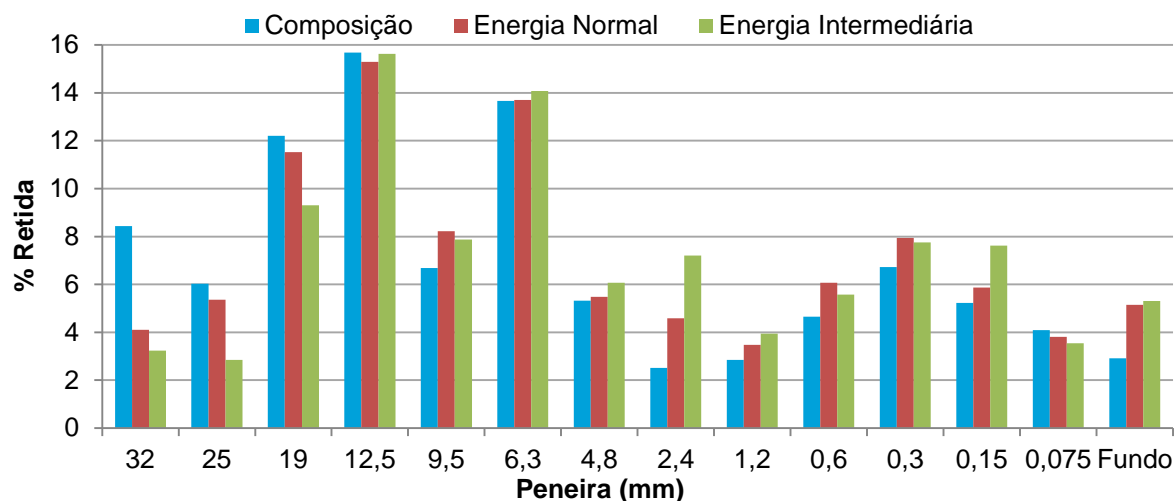


Figura 84 – Variação granulométrica após a compactação de amostras referentes à faixa A (FA-2011(2) EN e FA-2011(2) EI).

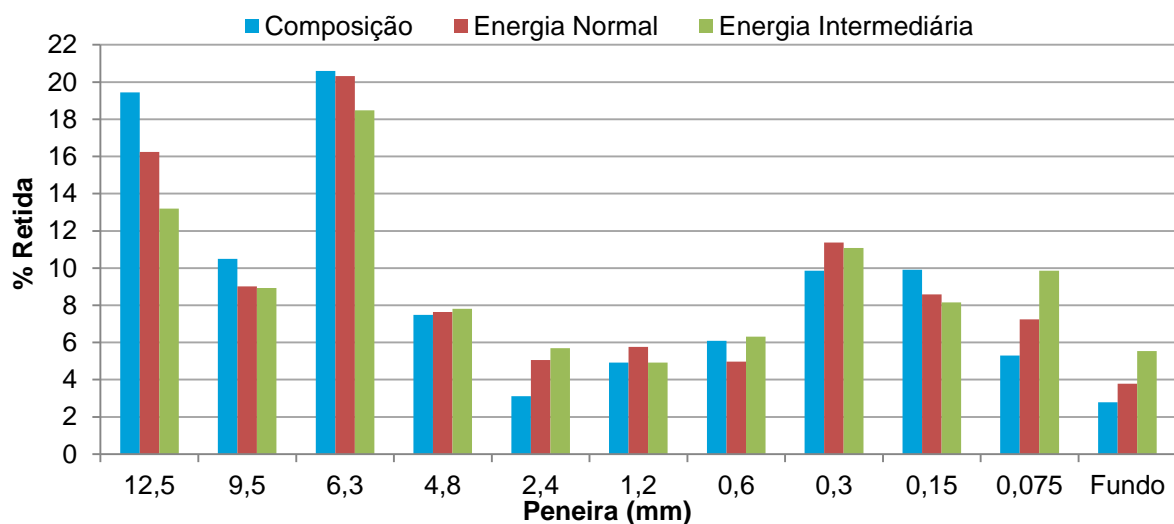


Figura 85 – Variação granulométrica após a compactação de amostras referentes à faixa C (FC-2011(2) EN e FC-2011(2) EI).

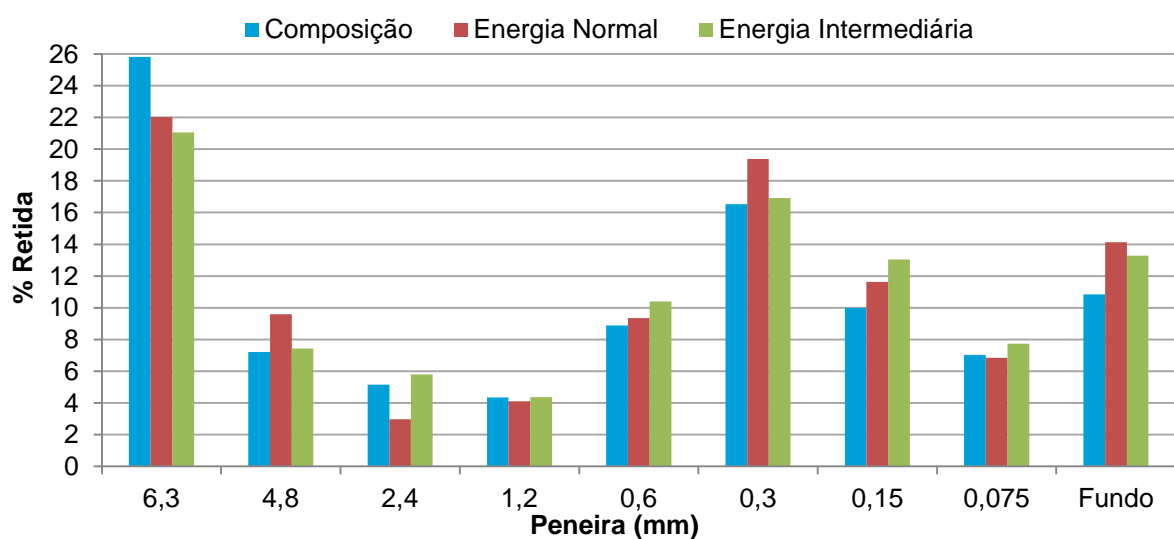


Figura 86 – Variação granulométrica após a compactação de amostras referentes à faixa E (FE-2011(2) EN e FE-2011(2) EI).

#### 4.4.5 Índice de forma

A forma das partículas influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas, assim como pode implicar a modificação da energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade. Nesse enfoque, a Tabela 38 apresenta os resultados de índice de forma das amostras provenientes de AM-2009 e AM-2011.

Os resultados demonstraram que as amostras ensaiadas antes da compactação possuem partículas mais alongadas e lamelares, o que não satisfaz a NBR 15116 (ABNT, 2004), pois descreve que o desejável seriam valores menores que 3. Isso só é alcançado após a compactação, onde há uma diminuição média desse índice em mais de 20%. Entretanto, o formato das partículas, o qual foi descrito no ensaio, contribuiu para o intertravamento das mesmas no ensaio de compactação, pois os agregados reciclados apresentaram grande quantidade de arestas afiadas.

Tabela 38 – Resultados do índice de forma.

<b>Amostra</b>	<b>Índice de forma</b>
AM-2009	3,04
AM-2011	3,62
AM-2009 (após compactação)	2,57
AM-2011 (após compactação)	2,48

#### 4.4.6 Lamelaridade

Os resultados exibidos na Tabela 39 demonstram que quase um terço das partículas provenientes da usina de beneficiamento é composto de partículas lamelares. Tais índices contribuem para a degradação das partículas por choques mecânicos, como expressos nos itens 4.3.3 e 4.4.4.

Como não existem normas específicas a respeito deste tipo de ensaio para agregados reciclados, esse ensaio foi realizado para efeitos de comparação com as britas graduadas. O qual demonstrou que os agregados reciclados não satisfazem

os parâmetros normativos descritos na NBR 11806 (ABNT, 1991), onde especifica que o índice de lamelaridade para utilização de britas graduadas em camadas de base e sub-base deve ser menor ou igual a 20%. Assim, do mesmo modo que o índice de forma, esse valor só é atingido após a execução da compactação, onde os resultados apontaram uma redução de aproximadamente 12%.

Tabela 39 – Resultados do índice de lamelaridade.

<b>Amostra</b>	<b>Índice de lamelaridade</b>
AM-2011	29,08%
AM-2011 (após compactação)	17,19%

#### 4.4.7 Índice de Suporte Califórnia

Para estimar o comportamento dos agregados que compuseram as faixas granulométricas perante o efeito das cargas que são aplicadas no pavimento, realizou-se o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC). O ensaio serve para avaliar a resistência do material frente a deslocamentos significativos, sendo obtida por meio de ensaio penetrométrico em laboratório. A resistência no ensaio ISC é uma resposta que combina indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material. Por isso, vale ressaltar que agregados que apresentam o mesmo valor de ISC podem possuir comportamentos diferentes quando submetidos à ação de cargas repetidas (BERNUCCI et al., 2006).

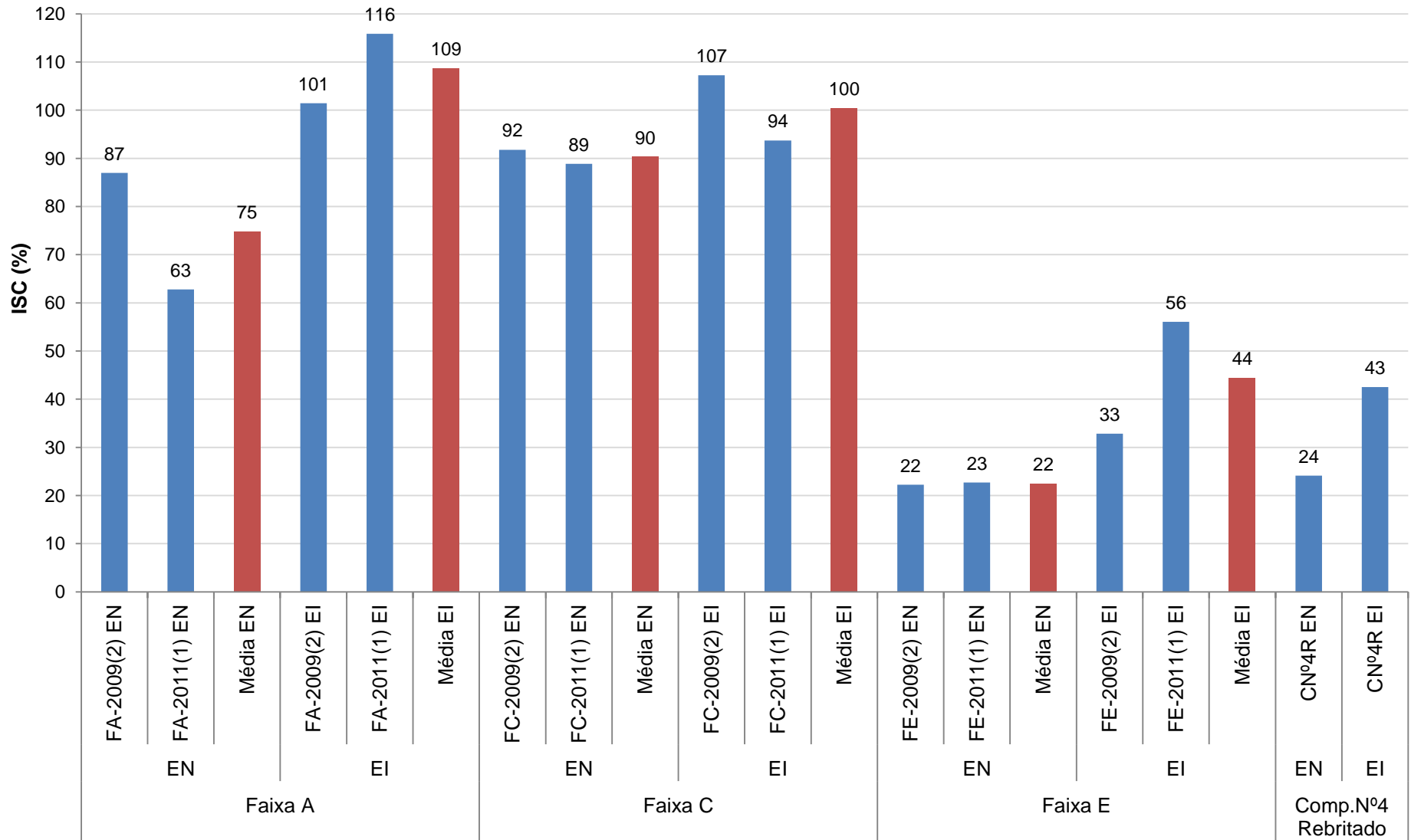
Os resultados descritos na Tabela 40 referem-se às amostras provenientes do segundo lote de AM-2009 e o primeiro lote de AM-2011, as quais foram submetidas ao ensaio conforme descrição normativa, ou seja, com a execução após a saturação.

Tabela 40 – Resultados do Índice de Suporte Califórnia.

Faixa/Composição	Energia	Amostra	ISC (%)	Expansão (%)
A	Normal	FA-2009(2) EN	87	0,03
		FA-2011(1) EN	63	0,01
	Intermediária	FA-2009(2) EI	101	0,01
		FA-2011(1) EI	116	0,01
C	Normal	FC-2009(2) EN	92	0,03
		FC-2011(1) EN	89	0,01
	Intermediária	FC-2009(2) EI	107	0,02
		FC-2011(1) EI	94	0,01
E	Normal	FE-2009(2) EN	22	0,01
		FE-2011(1) EN	23	0,02
	Intermediária	FE-2009(2) EI	33	0,01
		FE-2011(1) EI	56	0,00
Nº4 Rebitado	Normal	CNº4R EN	24	0,01
	Intermediária	CNº4R EI	43	0,01

\*As siglas “EN” e “EI” referem-se à Energia Normal e Energia Intermediária, respectivamente.

Por meio da Figura 87 nota-se que, dentro da mesma energia de compactação, quanto mais graúda for a distribuição granulométrica da faixa, maior será o ISC. Porém, ao comparar o comportamento entre as faixas A e C, destaca-se que as amostras compactadas na energia normal da faixa A obtiveram valores em média 15% menores que a faixa C; diferentemente da energia intermediária, onde as amostras derivadas da faixa A apresentaram valores em média 8% maiores que a C. Isso ficou claro durante a realização do ensaio, pois a faixa C obteve o melhor embricamento entre os agregados, em virtude da sua granulometria mais densa. Tal fato possibilitou aos arranjos que deram origem a essas amostras maior confiabilidade, pois apresentaram maior uniformidade nos resultados, visto que as oscilações nos valores não passaram de 10% da média entre todas as amostras dessa faixa, independente de energia aplicada.



\*As siglas “EN” e “EI” referem-se à Energia Normal e Energia Intermediária, respectivamente.  
 Figura 87 – Comparação entre os resultados de ISC.

O mesmo não se pode dizer do comportamento das amostras da faixa A, pois a granulometria predominantemente graúda deixou algumas amostras instáveis durante a realização do ensaio, isto é, com a utilização da energia normal alguns agregados de maior diâmetro não se embricaram satisfatoriamente. Nesse caso, esses agregados não apresentaram intertravamento satisfatório que nem foi obtido nas demais faixas, permanecendo alguns desses agregados em estado solto. Logo, por não estarem completamente confinados, o puncionamento do pistão sobre essas amostras proporcionou a quebra das algumas partículas maiores, implicando variações que alcançaram cerca de 24% de diferença entre os resultados. No entanto, ao se utilizar energia intermediária para a mesma faixa, as partículas amoldaram-se melhor ao cilindro, pois os vazios existentes eram preenchidos pela quebra das partículas maiores, como demonstrado na Figura 84, o que as deixou com maior compacidade e, por isso, alcançaram os maiores valores de ISC entre todas as faixas e energias. Ademais, apresentaram pequenas oscilações nos resultados, não passando de 8% da média dessas amostras.

Por apresentar a granulometria com maior porcentagem de agregados miúdos, as amostras da faixa E obtiveram os menores resultados de ISC, visto que em média eles chegam ao máximo a 30% dos valores encontrados nas demais faixas, quando comparadas somente às amostras compactadas na energia normal, e 40% quando comparadas somente as que utilizaram energia intermediária.

Como as amostras da faixa E obtiveram resultados de ISC similares aos encontrados na literatura para solos com granulometria correspondente a fração areia, compactou-se duas amostras constituídas somente pela composição N<sup>o</sup>4 Rebritado, na umidade ótima próxima a média de cada respectiva energia utilizada na faixa E, com objetivo de avaliar se há uma grande diferença de comportamento entre ambas. Com relação às amostras compactadas na energia normal, os resultados não apresentaram diferença significativa. No entanto, houve uma mudança de comportamento com relação às amostras compactadas na energia intermediária, a amostra FE-2009(2) EI apresentou resultado um pouco maior do que a metade do valor encontrado por FE-2011(1) EI, que possui 80% da sua estrutura composta pela composição N<sup>o</sup>4 Rebritado. Já a amostra CN<sup>o</sup>4R EI, que é composta somente por esta fração (a qual possui agregados miúdos mais finos que a composição N<sup>o</sup>4), alcançou o valor médio entre os resultados referentes à faixa E na respectiva energia.



Observa-se também que as amostras compactadas na energia intermediária obtiveram maiores valores de ISC, que compreenderam uma superioridade média aproximada de 33%, 10%, 22% e 18%, respectivamente para as faixas A, C, E e Composição N<sup>o</sup>4 Rebritado compactadas na energia normal. Vale ressaltar que nenhuma amostra submetida ao ISC apresentou expansibilidade significativa, pois os valores máximos encontrados para essa propriedade não ultrapassaram 0,03%, isso demonstra que os agregados reciclados utilizados nessa pesquisa não possuem materiais na sua constituição de característica expansiva.

Entretanto, Balbo (2007) relata que há uma limitação quanto ao ensaio de ISC. A imersão da amostra por 96 horas é realizada para simular uma enorme saturação do solo durante o degelo na primavera do hemisfério norte (local de onde foi transposta a norma para o Brasil), contudo os materiais podem trabalhar em uma umidade de equilíbrio diferente da umidade de compactação e distante da umidade de saturação. Além disso, em muitos solos e, principalmente, em agregados (britas graduadas) a permeabilidade é elevada, o que garante o rápido escoamento da água e uma drenagem satisfatória em camadas inferiores de pavimentos. Assim, o resultado do ISC, após a imersão, normalmente inferior, pode não ser o valor com que a camada irá suportar durante sua vida útil.

Por isso, os ensaios de ISC referentes ao segundo lote de amostras provenientes de AM-2011 foram executados sem imersão, sendo que o mesmo foi realizado logo após o ensaio de compactação desse lote. Assim, além de obter os valores do ISC para as amostras não saturadas, também pôde-se esboçar como se comportam as variações do ISC nos ramos seco e úmido (Tabela 41).

A Figura 88 demonstra graficamente o comportamento das amostras conforme aumentava-se a umidade. Em conformidade com o comportamento das britas graduadas, os valores do ISC da maioria das amostras acompanhavam a curva de compactação, com exceção das amostras FE-2011(2) EN e FE-2011(2) EI (correspondente às amostras da faixa E, compactadas nas energias normal e intermediária, respectivamente), as demais apresentaram valores de ISC menores no ramo seco, atingindo seus maiores resultados em pontos próximos da umidade ótima e decrescendo no ramo úmido. Além disso, nota-se que nas faixas de granulometria contínua, o ISC é mais sensível com o aumento no teor de umidade.

Tabela 41 – Resultados do Índice de Suporte Califórnia para amostras rompidas sem imersão.

Faixa	Amostra	Corpo de prova					
		1	2	3	4	5	
A	FA-2011(2) EN	Umidade (%)	10,7	12,2	13,7	16,2	17,8
		$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1788	1836	1874	1896	1883
		ISC (%)	100	110	121	124	110
	FA-2011(2) EI	Umidade (%)	10,0	10,9	12,3	13,7	16,0
		$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1724	1834	1923	1919	1873
		ISC (%)	129	165	199	196	108
C	FC-2011(2) EN	Umidade (%)	8,5	11,9	13,4	15,4	16,9
		$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1770	1927	1958	1930	1898
		ISC (%)	62	99	132	113	67
	FC-2011(2) EI	Umidade (%)	10,3	11,3	13,0	14,5	16,8
		$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1848	1900	2021	2033	1992
		ISC (%)	81	126	232	175	69
E	FE-2011(2) EN	Umidade (%)	11,8	13,1	14,5	16,2	18,8
		$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1749	1823	1887	1887	1798
		ISC (%)	42	85	79	54	23
	FE-2011(2) EI	Umidade (%)	10,3	12,4	14,3	15,9	18,6
		$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1829	1866	1946	2010	1985
		ISC (%)	51	85	123	63	27

\*As siglas “EN” e “EI” referem-se à Energia Normal e Energia Intermediária, respectivamente.

O motivo principal para as faixas A e C atingirem os melhores resultados de ISC na umidade ótima deve-se ao entrosamento que os diferentes tamanhos de partículas, que constituem a granulometria dessas faixas, atingiram com a diminuição do índice de vazios na umidade ótima. Ao contrário das amostras da faixa E que, por possuir granulometria majoritariamente miúda, apresentaram comportamento assemelhado ao de areias, decrescendo antes de chegar à umidade ótima.

Comparando os resultados dos ensaios realizados sem saturação com os que tiveram suas amostras saturadas, nota-se um acréscimo médio em torno de 50% no valor do ISC para todas as mostras compactadas na energia normal. Contudo, as

amostras compactadas na energia intermediária sofreram um acréscimo mais elevado, os valores foram de aproximadamente 90%, 130% e 80% a mais para as faixas A, C e E, respectivamente. Observa-se que o valor relativo à faixa C na energia intermediária se mostrou mais elevado que os demais, por isso compactou-se uma nova amostra na mesma umidade que apresentou o máximo ISC para comprovar a representatividade do resultado. No entanto, essa nova amostra exibiu um valor cerca de 5% inferior, demonstrando que o desempenho foi semelhante a anterior.

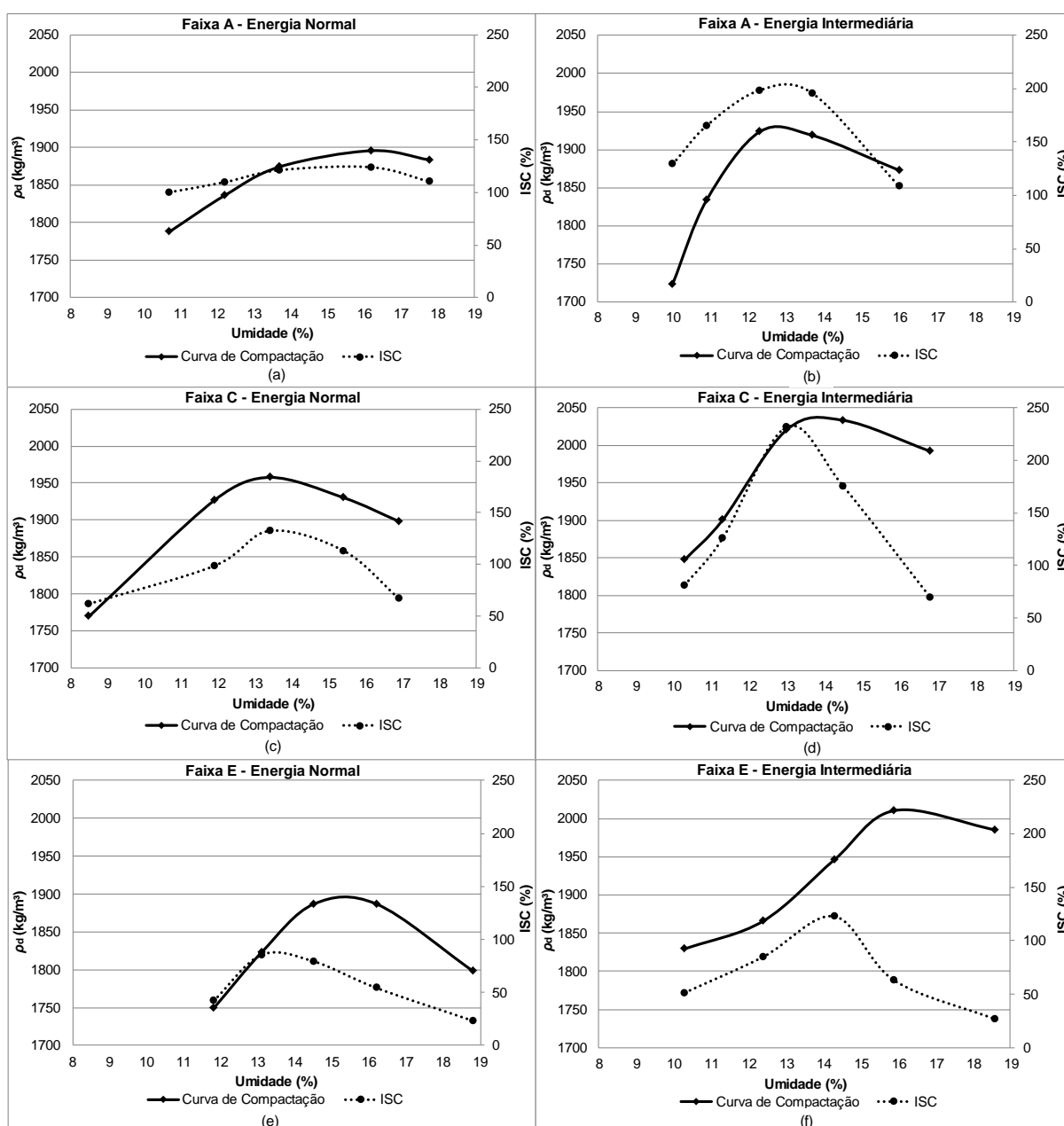


Figura 88 – Variação do ISC com o aumento da umidade. Relativo às amostras: (a) FA-2011(2) EN, (b) FA-2011(2) EI, (c) FC-2011(2) EN, (d) FC-2011(2) EI, (e) FE-2011(2) EN e (f) FE-2011(2) EI.

Como constatado acima, as amostras que sofreram imersão obtiveram valores de ISC menores que as demais não saturadas. Entre as causas para esse comportamento destacam-se a falta de coesão entre as partículas e a anulação da parcela de resistência devido à sucção, que era perdida em função da imersão. Notou-se também que, após a imersão, no momento que se retirava o cilindro do tanque, algumas partículas mais finas eram perdidas pelos furos presentes na base do molde que suporta o cilindro. Assim, as amostras sofreram carreamento de uma pequena porção de partículas pertencentes à fração miúda (material de enchimento) na parte superior, pois se deslocavam para parte inferior seguindo as linhas de fluxo criadas entre os vazios. Isso pode prejudicar o entrosamento das partículas, uma vez que a sobrecarga pode desagregar ou acomodar os materiais de forma diferente em virtude do aumento de espaços vazios causado por esse carreamento. Conseqüentemente, esse comportamento pode mudar a estrutura da amostra e, como resultado, inferir valores menores de resistência ao conjunto, principalmente os do ISC.

#### 4.4.8 Permeabilidade

A saturação dos materiais presentes nas camadas inferiores dos pavimentos pode propiciar o surgimento de patologias, assim como a formação de películas de água sobre o revestimento primário prejudica o atrito pneu-pavimento. A ocorrência desses problemas está ligada diretamente com a permeabilidade característica dos materiais constituintes dessas camadas. Dessa forma, verificou-se a percolação de água através de amostras compactadas na respectiva umidade ótima correspondente a cada faixa e energia adotada.

Os resultados expostos na Tabela 42, constituídos por amostras provenientes de AM-2011 (que possuem fração miúda composta por agregados mais finos - N°4 Rebritado), demonstram que todos os arranjos empregados nas faixas asseguram drenagem satisfatória para futura aplicação, pois os valores encontrados para o coeficiente de permeabilidade se encontram acima de  $10^{-3}$  cm/s, o que as caracterizou como sendo de alta permeabilidade.

Tabela 42 – Resultados do ensaio de permeabilidade com carga variável.

Faixa	Energia	Coefficiente de Permeabilidade (cm/s)
A	Normal	$3,74 \times 10^{-1}$
	Intermediária	$1,72 \times 10^{-1}$
C	Normal	$2,30 \times 10^{-1}$
	Intermediária	$1,58 \times 10^{-1}$
E	Normal	$1,80 \times 10^{-2}$
	Intermediária	$2,59 \times 10^{-3}$

Nota-se que os coeficientes de permeabilidade variavam conforme a granulometria da faixa e a energia de compactação aplicada. Assim, quanto mais agregados graúdos estiverem presentes na composição, maior será a permeabilidade apresentada. Porém, se considerarmos a energia de compactação, o comportamento é inverso, ou seja, quanto menor a energia aplicada, maior será a permeabilidade. Até mesmo o aumento na quebra de partículas, proveniente dessa mudança na energia de compactação, favorece o entrosamento entre as partículas, pois ajuda a preencher os vazios entre os agregados graúdos.

Propositamente realizou-se o ensaio de permeabilidade com uma amostra extra proveniente da Faixa A, compactada na energia normal, sem que a base que sustentava a amostra estivesse com o filtro delimitado na NBR14545 (ABNT, 2000). Essa amostra foi escolhida por apresentar o maior número de vazios e, por conseguinte, maior coeficiente de permeabilidade, assim poder-se-ia observar se haveria um carreamento das partículas mais finas, como relatado no item 4.4.7.

Os resultados demonstraram que a porcentagem de partículas finas expelidas pela conexão de exaustão era muito pequena, visto que não influenciou significativamente nos valores do conjunto, pois o resultado do coeficiente de permeabilidade para essa amostra foi de  $4,23 \times 10^{-1}$  cm/s. Assim, quanto à permeabilidade, esse pequeno carreamento não apresentou variação que influenciasse no comportamento do conjunto.

#### 4.4.9 Resistência à compressão simples

Os resultados da resistência à compressão simples (RCS) são demonstrados pela Tabela 43, a qual demonstra que as amostras provenientes das faixas A e C apresentaram menor resistência em função da granulometria predominante graúda, ocorrendo desagregação das amostras em baixa presença de carregamento. Já as amostras pertencentes à faixa E apresentaram resistência um pouco maior, pois o embricamento das suas partículas era favorecido em função da granulometria predominante miúda (Figura 89).

Tabela 43 – Resultados do ensaio de resistência à compressão simples.

Faixa	Cura (dias)	Resistência à compressão (KPa)		
		Amostra		
		1	2	3
A	0	43,72	39,97	48,34
	28	44,59	41,22	47,46
C	0	49,96	43,72	52,46
	28	74,94	51,21	62,45
E	0	58,14	52,46	48,71
	28	43,72	59,95	51,21

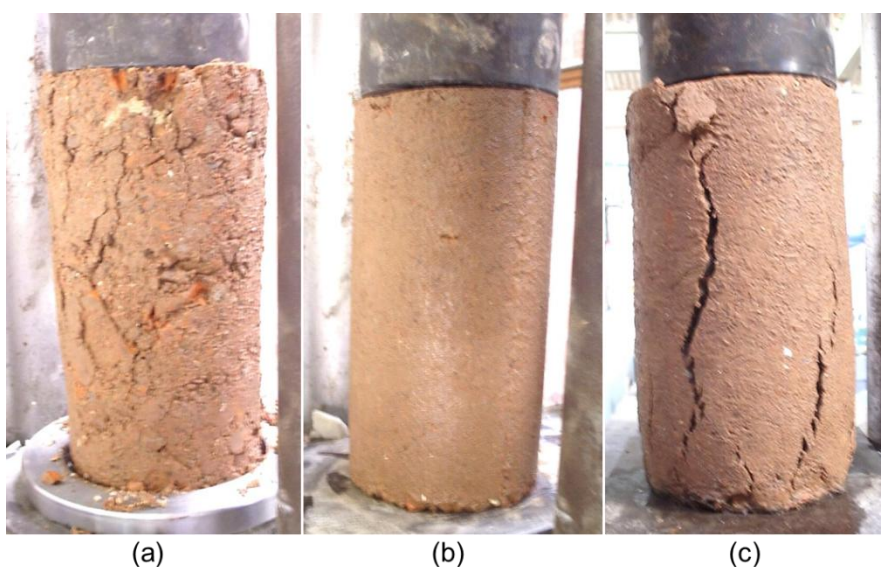


Figura 89 – Execução do ensaio RCS: (a) desagregação da amostra graúda, (b) coesão das partículas mais finas e (c) rompimento do corpo de prova.

Fonte: Acervo do Autor (2011).

Ressalta-se que os valores encontrados podem apresentar uma dispersão em virtude da heterogeneidade das composições e das condições do ensaio, pois o molde utilizado para realização deste era composto por um cilindro bipartido, o que implicou dificuldades ao se realizar a extração das amostras. Mesmo assim, observa-se que as amostras não apresentaram aumento da resistência após os 28 dias de cura. Deste modo, para um julgamento mais criterioso, faz-se necessário analisar novas amostras em um intervalo de tempo maior.

No entanto, nota-se que, independentemente da faixa, todas as amostras apresentaram resistência muito baixa, isso significa que não ostentam capacidade de suportar mesmo que pequenos carregamentos. Como as amostras foram somente compactadas, não apresentaram resistência sem estarem submetidas ao confinamento, porém pode-se dizer que essa resistência seria mais elevada na presença de um composto aglutinante.

#### 4.4.10 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados da resistência à tração por compressão diametral (RTCD) são demonstrados pela Tabela 44, na qual pode-se observar uma pequena dispersão nos resultados pertencentes à mesma faixa. Entre as razões para esse comportamento destaca-se a heterogeneidade das composições e as condições de ensaio, pois as amostras não apresentaram rigidez suficiente para o posicionamento sobre as tiras de chapa que posicionam a amostra para o rompimento. Por isso, essa pequena variação também foi proporcionada pelo deslocamento da amostra no momento da aplicação das cargas.

Nota-se que, em média, as amostras pertencentes à faixa E apresentaram melhores resultados quando rompidos após a moldagem, já os agregados pertencentes à faixa C apresentaram maior aumento de resistência após a cura de 28 dias. Ressalta-se novamente que somente a compactação não proporcionou às amostras capacidade de suportar pequenos carregamentos (Figura 90).

Tabela 44 – resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Faixa	Cura (dias)	Resistência à tração por compressão diametral (KPa)		
		Amostra		
		1	2	3
A	0	5,95	7,93	4,96
	28	5,37	8,92	12,39
C	0	6,94	8,92	9,42
	28	13,88	11,40	7,93
E	0	11,90	9,32	6,94
	28	8,92	7,93	9,91



Figura 90 – Execução do ensaio de RTCD: amostra no instante da ruptura.  
Fonte: Acervo do Autor (2011).

#### 4.4.11 Viabilidade econômica

##### 4.4.11.1 Dimensionamento de uma estrutura de pavimento

Para verificar se há viabilidade na aplicação de agregados reciclados, é necessário que o mesmo seja confrontado com materiais comumente utilizados em obras de pavimentação. Nesse caso, os agregados reciclados foram comparados com britas graduadas utilizadas na construção de um trecho localizado na região de Santa Maria, mais precisamente na Avenida Roraima (BR-287/RS, km 233,5), acesso à UFSM. O projeto elaborado pela Enecon (2007) seguiu os critérios presentes na Tabela 45. No entanto, como o foco da pesquisa é demonstrar a



diferença de custos entre os dois materiais, realizou-se um dimensionamento que atenda esses critérios de projeto pelo método do DNER presente no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).

Tabela 45 – Critérios de projeto para o trecho construído.

Número de veículos (N)	$5 \times 10^6$
Período de projeto	10 anos
$CBR_{\text{subleito}}$	9%

Fonte: Enecon (2007).

Para o número de veículos relatado no projeto, a espessura mínima do revestimento asfáltico disposta no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) é de 7,5cm. Desse modo, como o CBR do subleito possui valor considerado resistente para um solo, desprezou-se a utilização de reforço e sub-base, então procedeu-se diretamente para o cálculo da espessura de material granular ( $H_m$ ) pela equação (3):

$$H_m = 77,67 \cdot N^{0,0482} CBR^{-0,598} \quad (3)$$

Assim,

$$H_m = 77,67 \cdot (5 \cdot 10^6)^{0,0482} (9)^{-0,598}$$

$$H_m = 43,90 \text{ cm}$$

Conforme os resultados encontrados, utilizaram-se os coeficientes de equivalência estrutural presentes no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), que infere valores de  $K=2$  para revestimento betuminoso e  $K=1$  para bases granulares, para então proceder-se o cálculo da espessura da base granular pela equação (4):

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B = H_m \quad (4)$$

Assim,

$$7,5 \cdot 2 + B \cdot 1 = 43,90$$

$$B = 28,9 \text{ cm}$$

Portanto, adota-se:

$$B = 29 \text{ cm}$$

A partir dos resultados obtidos, a estrutura do pavimento dimensionada equivaleu-se a Figura 91. Nota-se que não foram considerados os detalhes construtivos, ou seja, a camada de Brita Graduada Simples (BGS) não foi decomposta para facilitar uma hipotética execução.

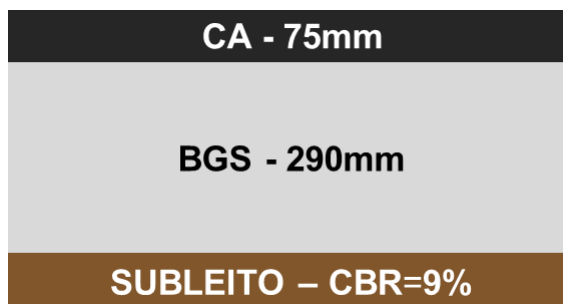


Figura 91 – Pavimento dimensionado com BGS.

Entretanto, a simples substituição da BGS por agregado reciclado não é válida, pois os materiais se comportam de maneira diferente, assim como a resistência suportada por ambos. Por isso deve-se dimensionar uma estrutura que utilize agregado reciclado e resista aos mesmos esforços que a composta por BGS.

#### 4.4.11.2 Análise Mecanicista

A análise mecanicista teve como objetivo encontrar uma estrutura de agregado reciclado que possua características técnicas semelhantes às obtidas pela BGS. Para isso, utilizou-se do programa “MnLayer” e adotou-se o eixo padrão (eixo simples com rodas duplas de 80kN), então procedeu-se a análise dos seguintes esforços:

- a) Deflexões máximas no topo do pavimento ( $D_{máx}$ );
- b) Máxima deformação específica de compressão ( $\epsilon_i$ ) na parte inferior da camada de concreto asfáltico (CA);
- c) Máxima tensão de tração ( $\sigma_v$ ) no topo do subleito.

A Tabela 46 demonstra os valores do Módulo de Resiliência ( $M_R$ ) e Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) utilizados na avaliação dos esforços da estrutura composta por BGS, a maioria dos quais procederam dos parâmetros encontrados

em Balbo (2007). Com relação ao Módulo de Resiliência, o valor adotado para o concreto asfáltico refere-se ao CAP 50/70, já o utilizado para a BGS está condicionado ao mínimo utilizado em projeto, para favorecer a segurança da estrutura. Diferentemente dos demais, o valor do Módulo de Resiliência referente ao subleito foi retirado do projeto do pavimento elaborado pela Enecon (2007).

Tabela 46 – Módulo de Resiliência ( $M_R$ ) e Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) utilizados na avaliação dos esforços referente à estrutura composta por BGS.

<b>Material</b>	<b><math>M_R</math></b>	<b><math>\nu</math></b>
CA	4000	0,32
BGS	200	0,37
Subleito	90	0,43

A ausência de equipamentos específicos para determinação do Módulo de Resiliência não possibilitou a realização desse ensaio com os agregados reciclados utilizados nessa pesquisa. No entanto, a pesquisa de Leite (2007) apresentou resultados a respeito de ensaios laboratoriais e utilização de agregados reciclados, os quais foram adequados para satisfazer a Faixa B do DNIT. Porém, a autora relata 28% dos agregados ficaram retidos na peneira 19mm, então a mesma quantia pôde ser substituída por agregado de diâmetro inferior a esse, como prescreve a NBR 6457 (ABNT, 1986). Assim, a distribuição granulométrica obtida pela autora após a substituição assemelhou-se a encontrada para a faixa C nessa pesquisa (Figura 92). Outras propriedades também se mostraram semelhantes, como a composição dos agregados reciclados e o ISC, que nessa pesquisa apresentou valores superiores para Faixa C compactada na energia intermediária. Da mesma forma, Leite (2001) relata que suas amostras compactadas na energia intermediária apresentaram Módulo de Resiliência variando entre 160MPa e 440MPa, conforme o nível de tensões de confinamento aplicado. Pela semelhança apresentada, adotaram-se valores no intervalo relatado pela autora (160MPa, 170MPa, 180MPa, 190MPa, 300MPa e 440MPa) para realizar a análise mecanicista e dimensionar um pavimento que possua características técnicas semelhantes ao dimensionado com BGS. Assim, pôde-se observar a variação da espessura da camada de base constituída por agregados reciclados em função da mudança nesse valor.

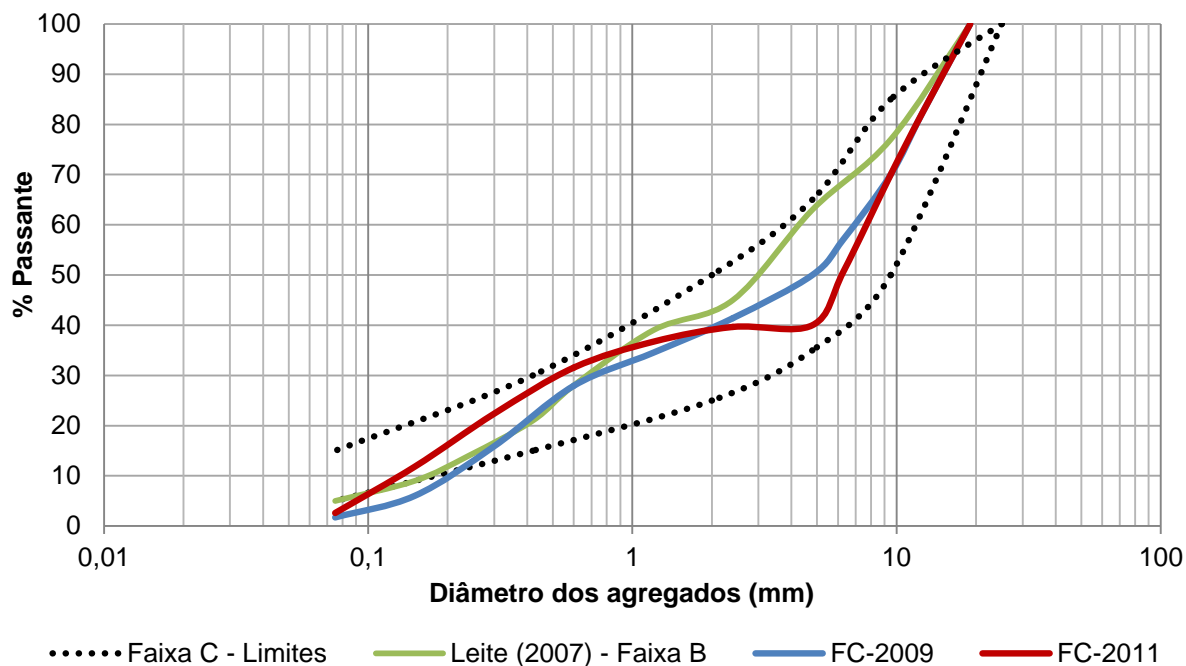


Figura 92 – Comparação entre as distribuições granulométricas enquadradas na faixa C nessa pesquisa com a curva granulométrica obtida por Leite (2007) para a faixa B.

Primeiramente, executou-se o programa “MnLayer”, o qual reproduziu os esforços produzidos pelo pavimento executado com BGS. De posse desses resultados, partiu-se para o dimensionamento de uma estrutura correspondente de agregados reciclados pelo método das tentativas, até que cada um dos valores adotados para o Módulo de Resiliência apresentasse a espessura da camada que mais se aproximasse das características técnicas da camada dimensionada com BGS. Conforme a Tabela 47 podem-se observar os resultados da análise mecanicista, assim como a variação que ocorria na espessura da camada de base constituída por agregados reciclados conforme se aumentava o valor do Módulo de Resiliência.

De acordo com os resultados apresentados, pode-se observar que o agregado reciclado de menor Módulo de Resiliência (160MPa) apresenta grandes deformações. Por isso, por meio dos valores da tensão de compressão no topo do subleito ( $\sigma_v$ ) e considerando o critério de ruptura por deformação permanente, nota-se que para o mesmo não produzir efeitos danosos sobre o subleito é necessário acrescentar 20mm de espessura a mais que o dimensionado para a BGS. Porém, conforme observam-se as deflexões, caso almeja-se que o pavimento composto por agregados reciclados tenha um comportamento semelhante à BGS em toda sua

estrutura, deve-se acrescentar 120mm a mais que o proposto para a BGS. Assim, a estrutura do pavimento referente ao agregado reciclado de menor módulo se equivale a BGS quando for composta por uma camada de base de 410mm.

Tabela 47 – Resultados da análise mecanicista referente às estruturas de pavimento compostas por BGS e agregado reciclado.

Material	$M_R$ (MPa)	Espessura da camada de Base (mm)	Camada/Esforços		
			CA		Subleito
			$D_{máx}$ ( $\times 10^{-2}$ mm)	$\epsilon_t$ ( $\times 10^{-4}$ m/m)	$\sigma_v$ (MPa)
BGS	200	290	64,0	3,82	-0,076
		290	68,2	4,09	-0,079
	160	320	67,2	4,03	-0,072
		380	65,2	3,94	-0,061
		410	64,2	3,90	-0,056
	170	290	67,1	4,01	-0,078
		360	64,5	3,88	-0,064
		400	63,1	3,83	-0,057
		410	62,7	3,81	-0,055
	180	290	65,9	3,95	-0,077
		300	65,6	3,93	-0,075
		330	64,4	3,86	-0,068
350		63,6	3,83	-0,065	
Agregado Reciclado	190	290	64,9	3,88	-0,077
		300	64,5	3,86	-0,074
		310	64,1	3,83	-0,072
		320	63,6	3,81	-0,070
	300	250	59,7	3,47	-0,080
		270	58,2	3,40	-0,075
		280	57,6	3,37	-0,072
		290	57,1	3,33	-0,070
	440	230	55,9	3,13	-0,078
		240	55,1	3,08	-0,075
		250	54,3	3,03	-0,073
		290	51,5	2,88	-0,062

$M_R$ : Módulo de Resiliência.

$D_{máx}$ : Deflexão máxima.

$\epsilon_t$ : Deformação específica máxima de tração.

$\sigma_v$ : Tensão máxima de tração.

Área hachurada: Estrutura que apresenta esforços mais próximos aos resultados pela BGS conforme o Módulo de Resiliência adotado.

Nota-se que, pelas deflexões e deformações apresentadas, quanto maior o Módulo de Resiliência, mais esbeltas podem ser as camadas, como era esperado. Porém, a capacidade de deformação desses agregados diminui conforme se aumenta o Módulo de Resiliência, por exemplo, as camadas dimensionadas com módulo de 300MPa e 440MPa são limitadas pelos efeitos que causam no subleito. Logo, as espessuras mínimas dessas camadas de base foram de 270mm e 240mm, respectivamente. Para melhor visualização, a comparação entre as espessuras encontradas é demonstrada pela Figura 93, onde se observa que a espessura da camada de base composta pelos agregados reciclados diminui quanto maior for o módulo adotado, o que indica comportamento semelhante à brita graduada.

Como é de consenso no meio técnico, o dimensionamento pelo método do CBR conduz a estruturas muito resilientes, o que acarreta em deformações específicas de tração elevadas no concreto asfáltico. Os valores encontrados na Tabela 47 para a base de BGS refletem o que fora escrito anteriormente. Sabendo-se previamente desta tendência, as comparações entre as diferentes estruturas não empregaram modelos de previsão de desempenho (fadiga e deformação permanente em trilha de roda), restringindo-se apenas a comparar tão somente os valores dos principais esforços nas estruturas.

<b>CA - 75mm</b>	<b>CA - 75mm</b>	<b>CA - 75mm</b>	<b>CA - 75mm</b>
<b>BGS - 290mm</b> M <sub>R</sub> =200MPa	<b>AGREGADO RECICLADO - 410mm</b> M <sub>R</sub> =160MPa	<b>AGREGADO RECICLADO - 400mm</b> M <sub>R</sub> =170MPa	<b>AGREGADO RECICLADO - 350mm</b> M <sub>R</sub> =180MPa
<b>SUBLEITO</b>	<b>SUBLEITO</b>	<b>SUBLEITO</b>	<b>SUBLEITO</b>
<b>CA - 75mm</b>	<b>CA - 75mm</b>	<b>CA - 75mm</b>	<b>CA - 75mm</b>
<b>BGS - 290mm</b> M <sub>R</sub> =200MPa	<b>AGREGADO RECICLADO - 320mm</b> M <sub>R</sub> =190MPa	<b>AGREGADO RECICLADO - 270mm</b> M <sub>R</sub> =300MPa	<b>AGREGADO RECICLADO - 240mm</b> M <sub>R</sub> =440MPa
<b>SUBLEITO</b>	<b>SUBLEITO</b>	<b>SUBLEITO</b>	<b>SUBLEITO</b>

M<sub>R</sub>: Módulo de Resiliência.

Figura 93 – Estruturas de pavimento constituídas por materiais distintos e comportamentos semelhantes: comparação entre as espessuras da camada de base conforme decresce o Módulo de Resiliência.

#### 4.4.11.3 Estimativa de custos

A partir dos resultados da análise mecanicista, estimaram-se os custos da camada de base executada com BGS e com agregados reciclados, conforme o Módulo de Resiliência delimitava a espessura da camada. Como os processos construtivos para vias de agregados reciclados são idênticos ao utilizado pela BGS, utilizaram-se as tabelas do Sistema de Custos Rodoviários – SICRO (DNIT, 2011) de Setembro de 2011 para comparar os valores entre ambos os materiais.

Para a obtenção da BGS, o SICRO (DNIT, 2011) prevê um valor referente ao insumo, isto é, material derivado da detonação e posterior britagem primária, que normalmente não possui uma granulometria definida. Para relacionar os custos referentes aos dois materiais, substituiu-se o valor do insumo referente à BGS pelo valor do agregado reciclado disponibilizado na cidade, pois o único processo existente na usina de beneficiamento é a britagem primária e, por isso, esse agregado necessita dos mesmos procedimentos que a BGS para utilização.

Segundo especificações do SICRO (DNIT, 2011), o valor dos insumos para obtenção da BGS é estipulado em R\$23,85 para cada metro cúbico destinado ao processamento (Tabela 28). Da mesma maneira, o valor dos agregados reciclados disponibilizados para venda na usina de beneficiamento de Santa Maria é de R\$12,00 (valor indicativo ao mês de Dezembro de 2011). Assim, são demonstrados os cálculos referentes aos processos supracitados, considerando os mesmos critérios apresentados nas Tabelas 28, 29 e 30.

Como ambos os materiais seguirão os mesmos processos de britagem secundária, usinagem e execução final da camada, os valores dos encargos após a obtenção dos insumos também se mantêm semelhantes. Dessa forma, as Tabelas 48, 49 e 50 descrevem esses processos e seus respectivos custos unitários de execução. Vale ressaltar que, para efeitos comparativos, adotou-se que a mesma capacidade produtiva.

Tabela 48 – Custos referentes ao agregado reciclado produzido em central de britagem de 80m³/h.

1 A 01 200 01 – Agregado produzido em central de britagem de 80m³/h		Produção da Equipe: 66,00m³		(Valores em R\$)		
A - Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário
		Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
E010 - Carregadeira de Pneus - 3,3m³ (147kW)	1.00	0.24	0.76	189.85	19.62	60.48
E225 - Conjunto de Britagem - 80m³/h (276kW)	1.00	1.00	0.00	447.88	19.62	447.89
E504 - Grupo Gerador - 288KVA (230kW)	1.00	1.00	0.00	127.32	15.13	127.33
Custo Horário de Equipamentos						635.69
B - Mão de Obra	Quantidade			Salário-Hora	Custo Horário	
T512 - Encarregado de britagem	1.00			39.24	39.24	
T701 - Servente	8.00			6.11	48.88	
Custo Horário da Mão-de-Obra						88.13
Adc.M.O. - Ferramentas: (15,51%)						13.67
Custo Horário de Execução						737.49
Custo Unitário de Execução						11.17
D - Atividades Auxiliares	Quantidade	Unidade			Preço Unitário	Custo Unitário
1 A 00 963 00 - Peças de Desgaste do Britador 80m³/h	0.0152	cjh			143.79	2.19
Insumos - Agregado Reciclado	0.57	m³			12.00	6.84
Custo Total das Atividades						9.03
Custo Unitário Direto Total						20.20
Preço Unitário Total						20.20

Área hachurada: item substituído.

Fonte: SICRO (DNIT, 2011).



Tabela 49 – Custos referentes à usinagem de agregado reciclado.

1 A 01 395 01 - Usinagem de agregado reciclado		Produção da Equipe: 121,00m³				(Valores em R\$)
A - Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário
		Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
E010 - Carregadeira de Pneus - 3,3m³ (147kW)	1.00	0.98	0.02	189.85	19.62	186.45
E106 - Usina Misturadora - de solos 300t/h (99kW)	1.00	1.00	0.00	103.59	20.74	103.60
E503 - Grupo Gerador - 164/180KVA (144kW)	1.00	1.00	0.00	85.94	15.13	85.94
Custo Horário de Equipamentos						375.99
B - Mão de Obra	Quantidade			Salário-Hora	Custo Horário	
T501 - Encarregado de turma	1.00			22.98	22.98	
T701 - Servente	5.00			6.11	30.55	
Custo Horário da Mão-de-Obra						53.54
Adc.M.O. - Ferramentas: (15,51%)						8.30
Custo Horário de Execução						437.83
Custo Unitário de Execução						3.62
D - Atividades Auxiliares	Quantidade	Unidade			Preço Unitário	Custo Unitário
Agregado produzido em central de britagem de 80m³/h	1.60	m³			20.20	32.32
Custo Total das Atividades						32.32
Custo Unitário Direto Total						35.94
Preço Unitário Total						35.94

Área hachurada: item substituído.  
 Fonte: SICRO (DNIT, 2011).

Tabela 50 – Custos referentes à execução de bases de agregado reciclado.

2 S 02 230 00 - Base de agregado reciclado		Produção da Equipe: 121,00m <sup>3</sup>				(Valores em R\$)
A - Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário
		Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
E102 - Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,2t (82kW)	1.00	0.73	0.27	118.93	15.13	90.91
E105 - Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25t (98 kW)	1.00	0.75	0.25	101.08	15.13	79.60
E109 - Distribuidor de Agregados - autopropelido (103kW)	1.00	0.89	0.11	126.39	19.62	114.65
E404 - Caminhão Basculante - 10m <sup>3</sup> - 15t (191kW)	3.56	1.00	0.00	127.62	17.93	454.36
E407 - Caminhão Tanque - 10.000l (191kW)	1.00	0.70	0.30	125.49	17.93	93.23
Custo Horário de Equipamentos						832.75
B - Mão de Obra	Quantidade				Salário-Hora	Custo Horário
T511 - Encarregado de pavimentação	1.00				39.24	39.24
T701 - Servente	3.00				6.11	18.33
Custo Horário da Mão-de-Obra						57.57
Adc.M.O. - Ferramentas: (15,51%)						8.93
Custo Horário de Execução						899.26
Custo Unitário de Execução						7.43
D - Atividades Auxiliares	Quantidade	Unidade			Preço Unitário	Custo Unitário
A 01 395 01 - Usinagem de agregado reciclado	1.0000	m <sup>3</sup>			35.94	35.94
Custo Total das Atividades						35.94
F - Transporte de Materiais Produzidos / Comerciais	Toneladas / Unidade de Serviço				Custo Unitário	
1 A 01 395 01 - Usinagem de brita graduada	2.4000					
Custo Unitário Direto Total						43.37
Lucro e Despesas Indiretas (27,84%)						12.07
Preço Unitário Total						55.44

Área hachurada: item substituído.

Fonte: SICRO (DNIT, 2011).

Observa-se que o custo total do metro cúbico de agregado reciclado executado na camada de base resulta em uma economia de aproximadamente 20% em relação ao custo da BGS. No entanto, essa comparação não reflete a real economia do emprego desse agregado, pois, como relatado no item 2.12.2, as características técnicas desses materiais diferem. Assim, ao encontrar as espessuras que possuíram características correspondentes, procedeu-se com o cálculo do custo equivalente.

Inicialmente, calculou-se o custo referente à camada de base executada com BGS. O comprimento adotado para o cálculo foi de 1000m, para estimar o custo por quilômetro, e a largura da pista de rolamento utilizada foi de 7,2m. Dessa forma, o volume de agregados utilizados na camada de base de 0,29m de BGS é apresentado pela equação (5):

$$Volume_{camada\ de\ BGS}(m^3) = Comprimento(m) \times Largura(m) \times Espessura(m) \quad (5)$$

Assim,

$$Volume_{camada\ de\ BGS} = 1000 \times 7,2 \times 0,29$$

$$Volume_{camada\ de\ BGS} = 2088m^3$$

Portanto, o custo referente a um quilômetro dessa base é indicado pela equação (6):

$$Custo(R\$) = Volume_{camada\ de\ BGS}(m^3) \times Custo\ unitário_{BGS}(R\$/m^3) \quad (6)$$

Assim,

$$Custo = 2088 \times 69,26$$

$$Custo = R\$144.615/km$$

Utilizando-se os mesmos procedimentos, porém com os valores referentes aos agregados reciclados, a Tabela 51 apresenta os custos da camada de base executada com esse material conforme o valor do Módulo de Resiliência adotado delimitou a espessura da camada.

Tabela 51 – Custo da execução da camada de base constituída por agregados reciclados conforme o Módulo de Resiliência adotado e sua respectiva espessura.

Comprimento da via (m):	1000					
Largura da Via (m):	7,2					
Custo do agregado (R\$/m <sup>3</sup> )	55,44					
M <sub>R</sub> adotado (MPa)	160	170	180	190	300	440
Espessura da camada (m)	0,41	0,40	0,35	0,32	0,27	0,24
Volume utilizado (m <sup>3</sup> /km)	2952	2880	2520	2304	1944	1728
R\$/km	163.659	159.668	139.709	127.734	107.776	95.801

Entretanto, como os agregados reciclados apresentam um custo unitário total cerca de 20% menor que a BGS, executou-se o processo inverso para determinar até que espessura uma camada executada com agregados reciclados apresentasse economia. Através da substituição do custo unitário, a equação (7) demonstrou o volume de agregados reciclados que apresenta custo correlativo à BGS:

$$Custo(R\$) = Volume_{camada\ de\ agregado\ reciclado}(m^3) \times Custo\ unitário(R\$/m^3) \quad (7)$$

Assim,

$$144.614,88 = Volume_{camada\ de\ agregado\ reciclado} \times 55,44$$

$$Volume_{camada\ de\ agregado\ reciclado} = 2608m^3$$

De posse do volume de agregados reciclados correspondente, partiu-se para determinação da espessura da camada que necessitaria desse volume, a qual é demonstrada pela equação (8):

$$Volume_{camada\ de\ agreg.\ reciclado}(m^3) = Comp.(m) \times Largura(m) \times Espessura(m) \quad (8)$$

Assim,

$$2608 = 1000 \times 7,2 \times Espessura$$

$$Espessura = 0,36m$$

A partir da espessura encontrada, que pode ser obtida utilizando-se o Módulo de Resiliência situado no intervalo entre 170MPa e 180MPa, pode-se afirmar que camadas que possuam até 360mm apresentam economia em relação à camada composta de 290mm de BGS dimensionada nessa pesquisa. Portanto, mesmo com

Módulos de Resiliência inferiores ao da BGS, o agregado reciclado apresenta economia caso não seja ultrapassado esse limite. Assim, conforme demonstrado na Tabela 47 e na Figura 93, as estruturas de agregados reciclados que possuem Módulo de Resiliência igual ou superior a 180MPa apresentam economia em relação à que utiliza BGS, onde chegou a 3,4% e 11,67% para as estruturas que utilizaram Módulo de Resiliência de 180MPa e 190MPa, respectivamente.

Observa-se que camadas com espessuras superiores a 360mm não apresentam economia para o caso simulado, como é o caso da espessura encontrada para a camada de agregados reciclados resultante do módulo de 160MPa, onde o montante de material necessário ocasiona um acréscimo de aproximadamente 13% no valor final em relação à BGS.

Mesmo que a substituição da BGS por agregado reciclado resulte em custo idêntico ou um pouco superior, o retorno para o meio ambiente obtido pela utilização de RCC torna-se uma alternativa promissora a ser estudada em projetos de pavimentação.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

A pesquisa mostrou de forma inequívoca a importância do correto gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil para o desenvolvimento sustentável das cidades brasileiras de médio porte. Sobretudo, aquelas que apresentam processos acelerados de urbanização, sofrem graves impactos ambientais provocados pela inadequada gestão dos resíduos da construção civil. Para tanto, iniciativas como as que foram apresentadas neste estudo, são alternativas para a solução de um problema que é corrente em nossas cidades, já que nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que o complexo da indústria da construção civil – caracterizado por ser o setor que indica o crescimento da economia – sofra grandes transformações.

Nesse enfoque, a cidade de Santa Maria apresentou pontos fortes quanto ao modelo de gestão de resíduos adotado. Entre os aspectos positivos destacou-se:

- a) **Plano de gerenciamento:** Os dispositivos legais e de execução para o gerenciamento de resíduos são bem elaborados, pois os atributos existentes podem capacitar todos os agentes envolvidos na gestão dos RCC;
- b) **Existência de artifícios para execução do plano:** A cidade possui todos os mecanismos necessários para a execução do plano de gerenciamento, que envolvem desde o ciclo de produção e transporte, até a destinação final e reciclagem dos RCC;
- c) **Produção de agregados reciclados:** A análise das características técnicas dos agregados reciclados produzidos na usina de beneficiamento demonstra que os mesmos possuem características semelhantes mesmo em épocas diferentes, o que indica uma uniformidade na produção. Assim, as características aqui demonstradas servem como indicador para elaboração de futuros projetos.

Entretanto, para aumentar a eficiência do modelo de gestão, há aspectos que devem ser melhorados, tais como:

- a) **Ações educativas:** A adoção de ações educativas que visem expor simplificada e orientações sobre o descarte de resíduos, contendo

também as implicações legais e os passivos ambientais que o descarte incorreto proporciona;

- b) **Facilitação na disposição:** Há a necessidade da criação de pontos de entrega voluntária (PEV) para facilitar o descarte correto e viável para o pequeno gerador;
- c) **Fiscalização:** Há a necessidade de aumentar (ou instituir) a fiscalização para a não proliferação de exemplos errôneos.

Com relação aos agregados reciclados, ressaltam-se algumas considerações importantes:

- a) **Resultados dentro dos parâmetros normativos:** Com relação à caracterização do agregado reciclado, os resultados demonstraram que o material não apresenta contaminação acima dos parâmetros normativos. Da mesma maneira, a abrasão e durabilidade, embora elevadas, satisfazem as especificações. Com relação ao ISC, conforme os parâmetros dispostos na NBR 15116 (ABNT, 2004) para utilização de agregados reciclados em diferentes camadas de pavimentos (Tabela 20), constatou-se que os arranjos que originaram as amostras pertencentes à faixa A e C satisfazem todos os parâmetros normativos, possibilitando suas utilizações em qualquer camada. Já os arranjos que deram origem à faixa E não podem ser utilizadas em camadas de base, pois as amostras não alcançaram ISC maior que 60%, ficando restritas às camadas de reforço do subleito, sub-base e revestimento primário.
- b) **Processo de composição granulométrica é necessário:** O método de composições granulométricas, utilizado para compor as amostras, apresentou boa resistência e estabilidade, com valores em média superiores ao encontrado na literatura para agregados reciclados *in natura*, ou seja, compactados com a granulometria adquirida após a britagem. Os melhores resultados foram alcançados pelas amostras referentes à faixa C, pela sua distribuição granulométrica mais equilibrada.
- c) **Maior energia de compactação implica melhor estabilidade:** As amostras compactadas na energia intermediária apresentaram valores de resistência superiores às demais. Além disso, o aumento da energia proporcionou maior

quebra nas partículas e, devido a isso, houve o preenchimento dos vazios, que culminou com a melhor acomodação das partículas.

- d) **Fração miúda mais fina ajudou no preenchimento dos vazios:** As amostras que utilizaram a fração miúda N<sup>o</sup>4 Rebritado apresentaram melhor preenchimento dos vazios. Entretanto, essas amostras apresentaram menores coeficientes de permeabilidade, porém dentro dos parâmetros de alta permeabilidade, não ultrapassando valores menores que  $10^{-3}$  cm/s.
- e) **Agregado misto não apresentou elevação significativa de resistência em pequeno tempo de cura:** Em 28 dias de cura, as amostras de agregados reciclados não apresentaram elevação da resistência. Dessa forma, para que isso ocorra, há a necessidade de adicionar algum agente aglomerante.
- f) **Apresenta economia mesmo em condições técnicas inferiores à brita graduada:** A partir da análise da viabilidade econômica constatou-se que os agregados reciclados apresentam um custo por metro cúbico que chega a ser 20% menor que a BGS. No entanto, essa análise não reflete o custo total em um pavimento; pois, para que sejam equiparados à BGS, os agregados devem apresentar a mesma resposta aos esforços. Contudo, esse comparativo foi elaborado para estimular a produção de agregados reciclados nas cidades brasileiras, já que foi executado considerando que as usinas possuíam a mesma capacidade produtiva (80m<sup>3</sup>/h). Por isso, em uma futura análise, deve-se considerar que o custo de produção está diretamente ligado à capacidade produtiva diária da usina.
- g) **A produção e a qualidade do agregado reciclado dependem do modelo de gestão utilizado na cidade:** O estudo também mostrou que a produção e a qualidade do agregado reciclado também dependem do modelo de gestão utilizado na cidade. Embora a implantação da ATT tenha sido fundamental para o tratamento de resíduos, a sua viabilidade está condicionada a pureza dos RCC que ingressam na área, ou seja, a quantidade de contaminantes presentes nas cargas limita o processo, pois pode diminuir a eficiência da triagem. Então, como o material utilizado para beneficiamento deve ser somente o derivado de classe A, a qualidade do agregado reciclado será prejudicada, já que o material não triado estará misturado a eles.



Se considerarmos que o índice de malha rodoviária nacional pavimentada é de apenas 12% (ANTT, 2009), os agregados reciclados caracterizados nessa pesquisa, assim como a adequação imposta a eles, mostraram-se uma boa alternativa para melhorar a infraestrutura de nossas rodovias. Isso também se aplica para uso em pavimentação de vias municipais e rurais, pois uma via pavimentada aumenta o volume de tráfego e, por conseguinte, o transporte das riquezas. Em decorrência disso, leva o desenvolvimento socioeconômico a essas regiões, e assim possibilita a utilização de grandes volumes de resíduos que atualmente são dispostos irregularmente na natureza, garantindo a sustentabilidade do nosso meio ambiente.

### 5.1 Sugestões para futuras pesquisas

Embora tenha se tornado uma potencial linha de pesquisa nos últimos anos, ainda há muitas lacunas existentes na literatura acerca dos resíduos da construção civil. Dessa forma, destacam-se algumas características que irão contribuir verticalmente para consolidação da reciclagem desse material e também para aplicação dos agregados reciclados em pavimentação:

- a) **Realização de ensaios de Módulo de Resiliência:** Fundamental para o dimensionamento de pavimentos, esse ensaio servirá para orientar o comportamento dos agregados conforme o estado de tensões aplicado;
- b) **Análise da durabilidade dos agregados reciclados:** Ensaio que visam acelerar a degradação dos agregados através de processos físicos, químicos e mecânicos, oferecerão um importante parâmetro para futura utilização desse material;
- c) **Monitoramento de um trecho experimental:** Monitorar as deflexões, deformações e o início da ocorrência de patologias, entre outras características, de um pavimento executado com agregados reciclados fornecerá parâmetros importantes referentes ao desempenho do pavimento sob ação do tráfego.
- d) **Elaboração de um modelo de desempenho:** Servirá como parâmetro comparativo com as britas graduadas para execução de um futuro projeto.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo. 200 p. 2011. Disponível em <[http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_apresentacao.cfm](http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm)>. Acesso em: 05 Nov. 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (BRASIL). **Anuário estatístico de transportes – AETT 2009**. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <[http://www.antt.gov.br/InformacoesTecnicas/aett/aett\\_2009/principal.asp](http://www.antt.gov.br/InformacoesTecnicas/aett/aett_2009/principal.asp)>. Acesso em: 22 jan. 2012.

AGOPYAN, V. Estudo dos Materiais de Construção Civil - Materiais Alternativos. **A Construção São Paulo**, São Paulo, n. 1935, p. 13-16, 1985.

AGOPYAN, V. **Números dos desperdícios**. Revista Técnica, São Paulo. Editora Pini, n.53, p. 30-33, ago. 2001.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

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

ANGULO, S. C.; JOHN, V.M. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. In: IX ENTAC - ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 2002. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu. 2002. p. 1613-1624.

ANGULO, S. C.; JOHN, V.M. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. v.1, n.1, p.22-32, Maio 2004.

ANGULO, S. C.; JOHN, V.M.; ULSEN, C.; KAHN, H. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. X

ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 2004. São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2004. p. 1-12.

ANGULO, S. C.; KAHN, H.; JOHN, V. M.; ULSEN, C., Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: VI SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES. 2003. São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON. 2003. p. 1-14.

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

ANGULO, S. C.; ULSEN, C.; KAHN, H.; JOHN, V. M. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2002. p. 1-12. Disponível em:

<<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/NOVOS%20MERCADOS%20RCD%20II.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2011.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES. 2001. São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON. 2001. p. 1-13.

ARM, M. Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests. **Waste Management and Research**, v.21, p.235-239, 2001.

ASSIS L. M. R., VILELA M. T. L.; SOUSA, 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. 2005. Curitiba. **Anais...** RAPv. Rio de Janeiro: ABPv, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508** - Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo –análise granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005**: Lixiviação de resíduos – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 16 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006**: Solubilização de resíduos – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro, 2004. 21 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11804**: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente - Especificação. Rio de Janeiro, 1991. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12253**: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000. 12 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 7 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 12 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 7 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004. 10 p.

\_\_\_\_\_. **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. 12 p.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica.** São Paulo: Oficina de textos, 2007. 558 p.

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado.** 1996. 222 f. Tese (Doutorado) – Universidade Politécnica de Catalunya, Barcelona, 1996.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos.** 1999. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

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

BERNARDES, A. **Quantificação e classificação dos resíduos de construção e demolição no município de Passo Fundo – RS.** 2006. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A .P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro. PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504 f.

BODI, J.; BRITO FILHO, J. A; ALMEIDA, S., Utilização de Entulho de Construção Civil Reciclado na Pavimentação Urbana. In: REUNIÃO ANUAL DE

PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. **Anais**. Rio de Janeiro: ABPv, 1995. p.409-436.

BOHNE, R., BERGSDAL, H., BRATTEBO, H. Dynamic eco-efficiency modeling for recycling or C&D waste. Norwegian University of Science and Technology-Industrial Ecology Programme. 2005. Disponível em: <<http://ntnu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:122156>> Acesso em: 07 nov. 2011.

BOSSINK, B.A.G.; BROUWERS, H. J. H. Construction waste: quantification and source evaluation. **Journal of Construction Engineering and Management**. Canadá, v.122, n.1, p.55-60, mar. 1996.

BRASIL, Lei n. 12.305, de 02 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 02 ago. 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 06 nov. 2011.

BRITO FILHO, J. A. Cidades versus entulhos. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., São Paulo, 1999. **Anais**. São Paulo, 1999. p.56-67.

CAIRNS, R.; DI NIRO, G., DOLARA, E. The use of RAC in prefabrication. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. **Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate**. London: Thomas Telford Pub, 1998, p.371-379.

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. 312 p.

CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C.; QUADROS, B. E.; COSTA, D. B.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V. Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 2000. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em: 07 nov. 2011.

CASSA, J. C.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção: projeto entulho bom**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001.312p.

CEF - CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Apoio à Implementação da Gestão de Resíduos de Construção e Demolição pelos Consórcios Públicos e Prefeituras Municipais.** Fundo Socioambiental CAIXA. 2011. Disponível em: <[http://www.caixa.gov.br/acaixa/Fundo\\_Socioambiental\\_edital3.asp](http://www.caixa.gov.br/acaixa/Fundo_Socioambiental_edital3.asp)> Acesso em: 05 nov. 2011.

CHINI, A. **Deconstruction and materials reuse — an international overview.** International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Rotterdam: CIB report TG 39, Publication 300. Mai. 2005. Disponível em: <[http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/TG39\\_Pub300.pdf](http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/TG39_Pub300.pdf)>. Acesso em: 01 nov. 2011.

CHINI, A. R.; KUO, S.; ARMAGHANI, J. M.; DUXBURY, J. P. Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track. **Journal of Transportation Engineering.** Reston, Virginia, v.127, n.6, p.486-492, 2001. Disponível em: <<http://ascelibrary.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JTPEDI000127000006000486000001&idtype=cvips&prog=search>>. Acesso em: 07 out. 2011

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil), Resolução CONAMA n. 01, de 23 de Janeiro de 1986. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 fev. 1986.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res8/res0186.html>>. Acesso em: 06 ago. 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil), Resolução CONAMA n. 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 jul. 2002.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 06 nov. 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil), Resolução CONAMA n. 348, de 16 de Agosto de 2004 Altera a Resolução CONAMA n.307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 ago. 2004.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res04/res34804.xml>>. Acesso em: 06 ago. 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil), Resolução CONAMA n. 431, de 24 de Maio de 2011. Altera o art. 3 da Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 25 mai. 2011.** Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649>>. Acesso em: 06 nov. 2011.

CORBIOLI, N. Do caos à solução. **Construção**, São Paulo, Ed. Pini, n.2505, p.4-7, fev. 1996.

CORONADO, M.; DOSAL, E.; COZ, A.; VIGURI, J. R.; ANDRÉS, A. Estimation of Construction and Demolition Waste (C&DW) Generation and Multicriteria Analysis of C&DW Management Alternatives: A Case Study in Spain. **Waste Biomass Valor.** Springer Netherlands. v. 2. p. 209-225. 2011.

CORSINI, R. Agregados reciclados. **Revista Guia da Construção**. São Paulo, 123. ed. Ed. Pini. Out. 2011. Disponível em: <<http://revista.construcaomercado.com.br/guia/habitacao-financiamento-imobiliario/123/agregados-reciclados-238497-1.asp>>. Acesso em: 21 out. 2011.

COSTA, L. C. S.; CASTRO, A. P.; REZENDE, L. R. Avaliação do desempenho de um pavimento executado com RCD após quatro anos de funcionamento. In: COBRAMSEG, 2010. Gramado, **Anais...** São Paulo: ABMS, 2010. 1 CD-ROM.

COSTA, N. A. A. **A reciclagem do resíduo de construção e demolição: uma aplicação da análise multivariada**. 2003. 203f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

DEGANI, C. M. **Sistema de gestão ambiental em empresas construtoras de edifícios**. 2003. 223 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

DAMINELI, B. L. **Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DAER/RS – EL 108/01**: Determinação do índice de lamelaridade Porto Alegre, 2001. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ES 300/97**: Pavimentação - reforço do subleito. Rio de Janeiro, 1997. 6 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ES 301/97**: Pavimentação - sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997. 7 p.



\_\_\_\_\_. **DNER-ME 035/98:** Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998. 6 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 049/94:** Solos - determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 14 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 080/94:** Solos - análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 083/98:** Agregados - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998. 5 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 089/94:** Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994. 6 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 129/94:** Solos - compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 152/95:** Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1995. 3 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 180/94:** Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 1994. 11 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 181/94:** Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 194/98:** Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998. 4 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 195/97:** Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997. 6 p.

\_\_\_\_\_. **DNIT 141/2010:** Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010. 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006. 274 p. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual\\_de\\_Pavimentacao\\_Versao\\_Final.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf)>. Acesso em: 22 jan. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Sistema de Custos Rodoviários - SICRO**. Custo unitário de referência do mês de setembro de 2011 para o estado do Rio grande do Sul. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em <<http://www.dnit.gov.br/servicos/sicro/sul>>. Acesso em: 22 jan. 2012.

DUART, M. A.; KOLLING, E; ROCHA, D. T. Uso de solo reforçado com cimento e resíduo da construção e demolição (RCD) para reaterro em valas de obras de infraestrutura urbana. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 17., 2011, Porto Alegre. **Anais...** RPU. Rio de Janeiro: ABPv, 2011.

ENECON S.A. - Engenheiros e Economistas Consultores. Projeto da rodovia RS-287, Km-233,5 (Acesso ao campus da UFSM). Volume 3 - Memória justificativa. 122 p. Porto Alegre, 2007.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Resource conservation challenge: campaigning against waste. 2002. 4 p. Disponível em: <<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/10000KXG.PDF?ZyActionP=PDF&Client=EPA&Index=2000%20Thru%202005&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C00THRU05%5CTEXT%5C00000005%5C10000KXG.txt&Query=&SearchMethod=1&FuzzyDegree=0&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&QField=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&Docs=>>>. Acesso em: 08 nov. 2011.

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

FERREIRA, M. R. P.; CARTAXO, E. F.; CRISÓSTOMO, H. S.; VALENÇA, P. M. A.; FROTA, C. A. Misturas com emulsão asfáltica e agregado alternativo. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 17., 2011, Porto Alegre. **Anais...** RPU. Rio de Janeiro: ABPv, 2011.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ), Rio de Janeiro, 2007.

GR2 - GESTÃO DE RESÍDUOS. Santa Maria, RS. 2010. Disponível em: <<http://www.gr2residuos.com.br>>. Acesso em: 22 jan. 2012.

HANSEN, T.C. **Recycled of demolished concrete and masonry**.. London: Chapman & Hall, 1992. 316p.

HARTLÉN, J. Environmental consequences of using residues. **Waste Management**, Great Britain v. 16, p. 1-6. 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X96000244>> Acesso em: 08 nov. 2011.

HENDRIKS, CH. F. Durable and sustainable construction materials. The Netherlands: Aeneas Technical Publishers. 2000.

HENDRICKS, F.; JANSSEN, G. M. T. Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road constructions. **Heron**, v.46, n.2, p.109-117, 2001. Disponível em: <<http://heron.tudelft.nl/46-2/4.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2011.

HENDRIKS, CH. F., PIETERSEN, H. S. Sustainable Raw Materials: Construction and Demolition Waste. **State-of-the-Art Report**. France: Rilem, Report 22, 216 p, 2000.

HORTEGAL M. V.; FERREIRA T. C.; SANT'ANA W. C. Utilização de agregados resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em São Luís – MA. **Pesquisa em Foco**. v. 17, n.2, p. 60-74, 2009.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Brasília, 2008. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB\\_2008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf)>. Acesso em: 06 nov. 2011.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades – Informações**. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 06 nov. 2011.

JADOVSKI, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

JACQUES, E. **Resíduos da construção civil podem gerar renda para cidades e empresas**. São Paulo, 2011. Disponível em:

<<http://atitudesustentavel.uol.com.br/blog/2011/09/16/geracao-de-renda-educacao-ambiental-e-mobilizacao-social-atraves-do-reaproveitamento-de-residuos-da-construcao-civil/>>. Acesso em: 10 out. 2011.

JOHN, V. M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem.** Artigo. São Paulo, 2000. Disponível em: <[http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a\\_construcao\\_e.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm)>. Acesso em: 10 out. 2011.

JOHN, V. M. **Aproveitamento de resíduos sólidos como material de construção.** In: CASSA, J. C.; CARNEIRO, A. P. ;BRUM, I. A. S. (Organ.). Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção: projeto entulho bom. Salvador: EDUFBA, 2001. p.28-45.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil:** contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000 113 f. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOHN, V. M., AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: SEMINÁRIO – RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, 2000, São Paulo, **Anais eletrônicos...** São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2011.

JOHN, V.M.; ANGULO, S.C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. Porto Alegre: Coletânea Habitare, v. 4, 2003. cap 2. p. 8-71.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Alternativas de gestão dos resíduos de gesso.** São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Alternativas%20para%20gest%C3%A3o%20de%20residuos%20de%20gesso%20v2.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2011.

JOHN, V. M.; ROCHA, J. C. **Utilização de resíduos na construção habitacional.** Porto Alegre: Coleção Habitare, v.4, ANTAC, 2003. 272 p.

JÚNIOR, N. B. C. **Cartilha de gerenciamento para resíduos sólidos da construção civil.** Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <<http://www.cacambasolympia.com.br/Sinduscon%20MG.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2011.

KAWANO, H. The state of using by-products in concrete in Japan and outline of JIS/TR on recycled concrete using recycled aggregate. In: PROCEEDINGS OF THE 1ST FIB CONGRESS ON RECYCLING, Osaka. 2002, 10 p. Disponível em:

<<http://www.pwri.go.jp/eng/activity/pdf/reports/kawano01.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2011.

KAZMIERCZAK, C. S. Resíduos de construção e demolição: um problema ou uma oportunidade de negócios? **Conselho em Revista**. Porto Alegre, n. 43. Mar. 2008. Disponível em: <[http://www.crea-rs.org.br/crea/pags/revista/43/CR43\\_area-tecnica-artigo1.pdf](http://www.crea-rs.org.br/crea/pags/revista/43/CR43_area-tecnica-artigo1.pdf)>. Acesso em: 06 nov. 2011.

KHAZANOVICH, L.; WANG, Q. C. MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program. **Transportation Research Record**. Washington, n. 2037. P. 63-75. 2007.

KIBERT, C. **Sustainable construction: green building design and delivery**. New York: Wiley, 2005. 448 p.

KIBERT, C. J.; CHINI, A. R. Deconstruction as an essential component of sustainable construction. In: KIBERT, C.J.; CHINI, A.R. Deconstruction and material reuse: technology, economy and policy. Florida: CIB, 2000. p. 6-13.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. Estimation of Construction Waste Generation and Management in Thailand. **Journal of Integrated Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 731-738, 2009.

KUNKEL, N. **RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL ALIADOS A PRODUÇÃO MAIS LIMPA (P+L)**. 2009. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

LAMS - LICENCIAMENTO AMBIENTAL EM MATO GROSSO DO SUL. 3 R's, 4 R's e 5 R's. Mato Grosso do Sul, 2011. Disponível em: <<http://www.licenciamentoambiental.eng.br/3-rs-4-rs-e-5-rs/>>. Acesso em: 13 out. 2011.

LATTERZA, L. M.; MACHADO JR., E. F. Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28. 1997, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EESC/USP, 1997. v.5, p.1967-1975.

LEITE, F.C, **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**.

2007. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos da construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEKARP, F; RICHARDSON, I. R.; DAWSON, A. Influences of Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Material. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1547, pp. 68 a 75. 1996.

LIM, Y.; YANG, S.; CHO, Y.; SUH, Y.; HWANG, B.; KIM, N. Performance of recycled crushed concrete for pavement materials. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, Tokyo, v.4, n.1, p.467-482, 2001.

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

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MANSUR, M. A.; WEE, T. H.; CHERAN, L. S. Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.96, n.4, p.478-484, jul./ago. 1999.

MARIANO, L. S. **Gerenciamento de resíduos da construção civil com reaproveitamento estrutural: estudo de caso de uma obra com 4.000m<sup>2</sup>**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MEDINA, J.; MOTTA. L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2ª ed. 2005. 574 p.

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

METSO – METSO BRASIL. **Produtos**. São Paulo. 2011. Disponível em: <[http://www.metso.com/inetMinerals/Brazil/mm\\_Brazilhome.nsf/FR?ReadForm&ATL=/inetMinerals/Brazil/mm\\_Brazilcontent.nsf/WebWID/WTB-050303-2256F-B4E0A](http://www.metso.com/inetMinerals/Brazil/mm_Brazilhome.nsf/FR?ReadForm&ATL=/inetMinerals/Brazil/mm_Brazilcontent.nsf/WebWID/WTB-050303-2256F-B4E0A)> Acesso em: 04 out. 2011.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo dos fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. São Paulo, 2000. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2009.

MOLENAAR, A. A. A.; VAN NIEKERK, A. A. Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. **Transportation Research Record**, Washington, n.1787, p.73-82, 2002.

MONTEIRO, J. H. P. et al. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2011.

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

MOTTA, L. M. G.; FERNADES, C. Utilização de resíduo sólido da construção civil em pavimentação urbana. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 12., 2003, Aracaju. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 2003.

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

MOURA, W.A.; GONÇALVES, J.P.; LEITE, R.S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassa de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Sitientibus**, Feira de Santana, n. 26, p. 49-61, jan./jun. 2002. Disponível em: <[http://www2.uefs.br/sitientibus/pdf/26/utilizacao\\_do\\_residuo\\_de\\_corte\\_de\\_marmore.pdf](http://www2.uefs.br/sitientibus/pdf/26/utilizacao_do_residuo_de_corte_de_marmore.pdf)>. Acesso em: 06 nov. 2011.

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.

NIEKERK, A. A. VAN; SCHEERS J. VAN; MURAYA, P.; KISIMBI, A. The Effect of Compaction on the Mechanical Behaviour of Mix Granulate Base Course Materials and on Pavement Performance. **HERON**, vol. 45, n° 3, pp. 197-218. 2000. Disponível em: <<http://heron.tudelft.nl/45-3/4.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2011.

OLIVEIRA, D. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de blocos de concreto produzidos com a utilização de entulho da construção civil**. 2003. 119f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2003.

OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA, J. N. F. Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 50, n. 314, abr./jun. 2004.

OLIVEIRA, M. J. E.; MATTOS, J. T.; ASSIS, C. S. Resíduos de concreto: classe III versus classe II. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. 2001, p. 87-95.

OLIVEIRA, M. J. E. **Materiais descartados pelas obras de construção civil: Estudo dos resíduos de concreto para reciclagem**. 2002. 191 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

O'MAHONY, M. M., MILLIGAN, G. W. E. Use of recycled materials in subbase layers. **Transportation Research Record**, Washington, n.1310, p.73-80, 1991.

PASCUAL M, CLADERA A. Demolition waste management in Majorca: the particular case of an Island. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004. Barcelona. **Anais...** Barcelona: RILEM, 2004, p. 245-254.

PENG, C.; SCORPIO, D. E.; KILBERT, C. J. Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. **Construction, Management and Economics**, London, v.15, n.1, p.49-58, 1997.



PIOVEZAN JR., G.T.A, **Avaliação dos resíduos da construção civil (RCC) gerados no município de Santa Maria**. 2007. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas**. 1986. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PINTO, T. P. Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP. São Paulo: Obra Limpa: I&T: SindusCon-SP, 48 p. 2005. Disponível em: <[http://www.gerenciamento.ufba.br/Downloads/Manual\\_Residuos\\_Solidos.pdf](http://www.gerenciamento.ufba.br/Downloads/Manual_Residuos_Solidos.pdf)>. Acesso em: 06 Nov. 2011.

POON, C. S.; CHAN, D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. **Construction and Building Materials**, v.20, p.578-585, 2006.

REID, J. M. **The use of alternative materials in road construction**. United Kingdom, 2000. 8 p. Disponível em: <[http://www.viastrade.it/letteratura/materiali/TRL\\_TO\\_ALT\\_MAT.pdf](http://www.viastrade.it/letteratura/materiali/TRL_TO_ALT_MAT.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2011.

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

RICARDO, H. S.; CATALINI, G. **Manual prático de escavação: terraplenagem e escavação de rocha**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1990. 668 p.

ROCHA LIMA, J. Conceito de taxa de retorno. São Paulo: EPUSP, 1996, 68 p. Disponível em: <<http://publicacoes.pcc.usp.br/PDFs%20novos/BTs/BT-158.pdf>>. Acesso em: 07 out. 2011.

SANTANA, M. J. A.; SAMPAIO, T. S.; CARNEIRO, A. P. Uso do agregado reciclado em argamassas de revestimento. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J.

C. S. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**: projeto entulho bom. Salvador: EDUFBA, 2001. Cap.8, p.262-299.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia.) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SBM britadores. **Plantas móveis**. São Paulo, 2011. Disponível em: <[http://www.britadoresmoveis.com/mobile\\_plant.html](http://www.britadoresmoveis.com/mobile_plant.html)>. Acesso em: 12 nov. 2011.

SCOTT HOOD, R. S. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização de Resíduos de Construção e Demolição como Agregado Miúdo Reciclado na Confecção de Blocos de Concreto para Pavimentação**. 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

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

SCHULZ, R.; HENDRICKS, F. Recycling of masonry rubble. In: HANSEN, T. C. **Recycling of Demolished Concrete and Masonry**. London: RILEM, 1992. cap. 2, p. 139-239.

SILVA, C. A. R.; PADULA, F. R. G.; Utilização do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 17., 2011, Porto Alegre. **Anais...** RPU. Rio de Janeiro: ABPv, 2011.

SOLIS-GUZMAN, J.; MARRERO, M.; MONTES-DELGADO, M.; RAMIREZ-DE-ARELLANO, A. A Spanish model for quantification and management of construction waste. **Waste Management**, Great Britain, v. 29, p. 2542-2548, 2009.

SONIGO, P.; HESTIN, M.; MIMID, S. Management of construction and demolition waste in Europe. In: STAKEHOLDERS WORKSHOP, 2010. Bruxelas. jun. 2010. Disponível em: <<http://www.eu-smr.eu/cdw/docs/Mathieu%20Hestin%20-%20Construction%20and%20Demolition%20Waste%20-%2021062010.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2011.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto**: aplicação ao uso de entulho como

agregado reciclado. 2001. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Brasília, Brasília. 2001.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A. C. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente construído**. Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 33-46. Out./Dez 2004.

TÉCHNE. **Reciclagem: uso de resíduos da construção**. Revista Técnica, São Paulo: Editora Pini, n.112, p. 32-35, jul. 2006.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **Eco-efficient Construction and Building Materials**. London: Springer. 2011. 247 p.

TOZZI, R. F. **Estudo da influencia do gerenciamento na geração de resíduos da construção civil (RCC): estudo de caso de duas obras em Curitiba-PR**. 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

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

ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

VALENÇA, P. M. A.; CARTAXO, E. F.; SOUZA, R.J. Q.; CAVALCANTE, D. G.; FROTA, C. A. Misturas mornas com areia de RCD para a cidade de Manaus/AM. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 17., 2011, Porto Alegre. **Anais...** RPU. Rio de Janeiro: ABPv, 2011.

VÁZQUEZ, E. Utilización de resíduos em la C.E.E.: aspectos políticos y ambientales. Estado del arte y normalización. In: RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: PCC – USP, 1997, p.64-66.

VÁZQUEZ, E. **Introdução**. In: CASSA, J. C.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. (Org.). Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção: projeto entulho bom. Salvador: EDUFBA, 2001. p. 22-25.

VON STEIN, E. L. Construction and demolition debris. In: **Recycling Handbook**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2000, cap. 20, 976p.

WEISLEDER, S.; NASSERI, D. **Construction and demolition waste management in Germany**. 2006. Hamburg: ZEBAU GmbH, 27 out. 2006. 82 p. Disponível em: <[http://cowam.tec-hh.net/Germany\\_CD\\_Waste.pdf](http://cowam.tec-hh.net/Germany_CD_Waste.pdf)>. Acesso em: 31 out. 2011.

WILBURN, D. R.; GOONAN, T. G. Aggregates from Natural and Recycled Sources: Economic assessments for construction applications: a materials flow analysis. **U.S. Geological Survey Circular 1176**. Denver, 37 p., 1998. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/circ/1998/c1176/c1176.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2011.

XAVIER, L. L. **Diagnóstico do resíduo da construção civil na cidade de Florianópolis. Florianópolis**. 2001. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

XAVIER L. L.; BRITO, L. A.; CAVALCANTE, J. R; CHERIAF, M. Diagnóstico do resíduo de construção civil da região de Florianópolis e sua potencialização como agregado graúdo para a confecção de novos concretos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ANTAC:UFPR:UEL, 2002.

ZORDAN, S. E. **A Utilização do Entulho como Agregado na Confecção do Concreto**. 1997. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

ZORDAN, S. E. **Entulho da indústria da construção civil**. EPUSP, São Paulo, 2006. Disponível em: <[http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho\\_ind\\_ccivil.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm)>. Acesso em: 09 nov. 2011.

ZORDAN, S. E. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos**. 2003. 481 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ZORDAN, S. E.; PAULON, V. A. A utilização do entulho como agregado para o concreto. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 1998, p.923-932.