



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

MARÍLIA NEVES MARINHO

ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS
BETUMINOSOS USINADOS A QUENTE COM O USO DE AGREGADO
GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO

RECIFE

2011

MARÍLIA NEVES MARINHO

Análise do desempenho mecânico de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas/Construção Civil.

Orientação interna: **Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.**

Orientação externa: **Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda.**

RECIFE

2011

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M338a Marinho, Marília Neves.

Análise do desempenho mecânico de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto / Marília Neves Marinho. - Recife: O Autor, 2011.

146 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Co-Orientador: Prof. Dr. Leonardo Fagundes Roseback Miranda.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.

CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2011.

Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia Civil. 2. Resíduos de construção civil. 3. Reciclagem. 4. CBUQ. 5. Pavimentação. 6. Agregado. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira. II. Miranda, Leonardo Fagundes Roseback. III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2011-209

MARÍLIA NEVES MARINHO

Análise do desempenho mecânico de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto

Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Recife, 29 de julho de 2011.

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro
(Orientador Interno PPGEC/UFPE)

Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda
(Orientador Externo PPGCC/UFPR)

Prof. Dr. Oswaldo Cavalcanti da Costa Lima Neto
(Examinador Interno PPGEC/UFPE)

Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto
(Examinador Externo PPGECAM/UFPE/CAA)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Moacir e Conceição.
Aos meus avós (*in memoriam*), Leão e Estelita, Jordi e Ana.

AGRADECIMENTOS

Mesmo correndo o risco de esquecer alguns nomes, gostaria de externar os meus mais sinceros agradecimentos, pois a amizade, o apoio e a ajuda de muitas pessoas contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente e em tudo que me acontece, a Deus, por presentear-me diariamente com saúde, amor, força, fé, perseverança, realizações e alegrias... Conduzindo e iluminando minha existência!!

Em especial ao meu pai Moacir, pelo apoio durante todo o Mestrado, me acompanhando nas viagens e nos experimentos realizados na UFC. Esta conquista também é sua.

Aos meus pais, Moacir e Conceição, pela minha formação e valores, por todo amor que recebo e porque são meus exemplos de coragem, superação, honestidade, generosidade e determinação.

Aos meus irmãos (que tanto admiro!), Magaly e Moacir, pelo apoio, compreensão e incentivos.

À Marcela, minha sobrinha, pelo carinho e generosidade, pelas vezes em que dividiu comigo o “seu cantinho”.

A minha tia Bernadete, talvez, sem a ajuda dela no início da minha carreira profissional, hoje eu não estivesse mais atuando como Engenheira Civil.

Ao Prof. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda, orientador externo, pela oportunidade, paciência, interesse, conselhos e dedicação. Pela responsabilidade, critério e competência com que conduziu este trabalho, mesmo à distância. Por ter “aberto o caminho” para que eu me desenvolvesse em dois temas tão gratificantes: resíduos de construção e misturas asfálticas. Apesar de todas as dificuldades enfrentadas ao longo deste trabalho, em momento algum me arrependi desta escolha.

Ao Prof. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro, orientador interno, pelo apoio e palavras de encorajamento e incentivo. Pela amizade e confiança desenvolvidas ao longo deste trabalho. Pelos momentos de descontração e atenção com que sempre me recebeu.

A ambos por, apesar de saberem que eu estava morando e trabalhando em outra cidade e não poderia dedicar-me exclusivamente ao Mestrado com a “doação” que um trabalho acadêmico

deste nível requer, me acolheram de braços abertos e acreditaram que eu seria capaz. Por termos chegado juntos à conclusão desta pesquisa.

À Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade de realização deste Mestrado, sonho antigo... Sinto-me privilegiada num país onde o acesso à educação de qualidade ainda é restrito a poucos.

Aos Professores Amaro Henrique Pessoa Lins (Reitor da UFPE), José Maria Justino (Prefeito da UFPE) e Washington Moura de Amorim Júnior (Presidente da Comissão de Fiscalização de Obras da UFPE), pelos incentivos, confiança e oportunidades de aprendizagem que me tem sido dadas durante o grato convívio profissional; e pela compreensão e apoio indispensáveis para a conclusão deste trabalho. O meu sincero carinho, reconhecimento e admiração.

Aos Professores José Mariano de Sá Aragão e Nélio Vieira de Melo (respectivamente Diretor e Vice-Diretor do Campus Agreste da UFPE, onde trabalho), pela compreensão, generosidade e apoio desde o início das minhas atividades na fundação do Campus Agreste e no decorrer do curso de Mestrado, principalmente na etapa final para conclusão desta dissertação. Confirmando o compromisso da Instituição com a educação e formação continuada. A minha gratidão, sempre!

À Profa. Verônica T. F. Castelo Branco do DET/LMP/UFC, por compartilhar seus conhecimentos e pelas importantes sugestões na condução dos ensaios de caracterização mecânica das misturas. Pela acolhida e apoio incondicionais, disponibilizando o LMP e sua equipe de alunos e técnicos quando necessitei ir a Fortaleza para a realização dos ensaios.

A toda a equipe do LMP/UFC, em especial à Manuela Mesquita (mestranda), João Luiz (técnico e aluno da graduação), Rômulo (técnico), Fernando Felipe Antunes e Felipe Onofre (alunos de graduação e bolsistas), a ajuda de vocês e a troca de informações muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Jorge Barbosa (coordenador da Rede Asfalto N/NE), que tanto contribui para o desenvolvimento técnico/científico de inúmeros alunos, coordenando projetos e capacitando profissionais e empresas no setor de pavimentação.

À Anie (secretária da Rede Asfalto N/NE), pelo apoio e companhia quando estive em Fortaleza para a realização dos ensaios.

Às irmãs Fátima Alves e Socorro Alves pela generosidade, acolhida e amizade quando estive em Fortaleza para a realização dos ensaios.

A minha amiga Carmen Sousa (gabinete do Reitor/UFPE), sinto-me feliz em poder chamá-la de amiga e tê-la no meu convívio profissional. A sua competência, generosidade e dedicação muito têm contribuído para que consigamos solucionar os problemas e pendências cotidianas do nosso trabalho, e indiretamente também me ajudaram neste Mestrado.

Aos alunos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, em especial Elaine Rocha, Karoline Melo, Luiz Priori, Aline Nóbrega, Josué Sousa, Inaldo, Jorge Lima, Nilma Andrade, Bruno Ceotto, Marília Lopes, Marcondes, Alex, Geovani Almeida pelas ajudas, dúvidas, inseguranças, conselhos, incentivos e risadas compartilhados. A companhia de vocês disfarçou as dificuldades proporcionando momentos de descontração e uma grata convivência.

À Andréa Negromonte, secretária do PPGEC/UFPE e colega dos tempos de graduação, pelos conselhos e ajudas com constante (e inesquecível) bom humor.

À Cacau, secretária do PPGEC/UFPE, pela amizade e confiança compartilhadas, desde quando trabalhamos juntas no Campus Agreste.

Ao Prof. Maurício Andrade (Campus Agreste/UFPE) pela disponibilidade, paciência e importantes conselhos.

À Marília Previatello, aluna de iniciação científica/UFPE, que auxiliou com a realização do ensaio de adesividade.

Às Usinas de Asfalto Andrade Guedes (Sr. Neno) e Lidermac (Gláucio Carneiro Leão Filho, colega dos tempos de graduação), que disponibilizaram o laboratório, equipamentos e materiais para a realização das misturas e ensaios Marshall.

Aos técnicos da Andrade Guedes (Sr. Eraldo, Jailson e Wedson) e da Lidermac (Wellington e Sandro), pelo inegável esforço e ajuda para a realização das misturas.

À Usina de Reciclagem da Prefeitura Municipal de João Pessoa/PB, pela doação dos agregados reciclados de concreto utilizados nesta pesquisa.

Aos alunos e professores do Campus Agreste/UFPE e àqueles colegas de trabalho que sempre torceram por mim. Não citarei nomes para não parecer injusta ao esquecer alguém.

Por fim, a todos aqueles que, mesmo não tendo sido diretamente citados aqui, estando próximos ou distantes, me apoiaram e ficaram felizes por esta minha conquista.

MUITO OBRIGADA!!

RESUMO

MARINHO, M. N. **Análise do desempenho mecânico de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto.** 2011. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

Diante da problemática sócio-ambiental gerada pelo elevado volume de resíduos de construção civil (RCC) descartados nas cidades brasileiras, muitos esforços têm sido feitos no sentido de ampliar a reciclagem de RCC. Uma das formas de se conseguir isto é aumentando as alternativas de aplicações dos agregados reciclados. O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas de concretos betuminosos usinados a quente (CBUQ) nos quais houve a substituição de 0% (mistura padrão), 25%, 50%, 75% e 100% dos agregados graúdos pétreos naturais por agregado graúdo reciclado e lavado de concreto. Para a verificação do desempenho das misturas projetadas, realizaram-se os ensaios de caracterização dos agregados, os ensaios volumétricos da metodologia Marshall e os ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR) e vida de fadiga em diferentes níveis de tensões (20%, 30%, 40% e 50% da resistência à tração). Os agregados reciclados e lavados de concreto, apesar de possuírem elevada absorção, apresentaram características satisfatórias, que se enquadram nas especificações do DNIT para emprego em concretos asfálticos. Os ensaios volumétricos e mecânicos realizados na mistura de referência e nas misturas com estes reciclados apresentaram semelhança entre os resultados, sem aumento do consumo de ligante. Algumas propriedades do CBUQ apresentaram uma tendência de correlação linear com a absorção de água da fração graúda. À medida que aumentava a absorção de água da fração graúda da mistura, observou-se uma pequena diminuição nos resultados das propriedades mecânicas com relação à mistura de referência. No entanto, todos os resultados obtidos ficaram acima dos limites mínimos estabelecidos pelas normas do DNIT, indicando uma possível viabilidade técnica para execução de concretos asfálticos com o aproveitamento destes resíduos, de maneira a contribuir para a minimização dos problemas relacionados à disposição final.

Palavras-chave: resíduos de construção civil, reciclagem, CBUQ, pavimentação, agregado reciclado.

ABSTRACT

Given the social and environmental problems generated by the high volume of construction and demolition waste (CDW) discarded in Brazilian cities, many efforts have been made to increase the recycling of CDW. One way of achieving this is by increasing alternative applications of recycled aggregates.

The objective of this study is to evaluate the mechanical properties of hot mix asphalt (HMA) in which it was replaced 0% (standard mix), 25%, 50%, 75% and 100% of natural stony coarse aggregate by washed and recycled coarse aggregate made of concrete. To verify the performance of the designed mixtures, tests were realized to characterize the aggregates, the volumetric Marshall methodology and the mechanical properties of tensile strength by diametrical compression, resilient modulus and fatigue life in different levels of stress (20%, 30%, 40% and 50%) of tensile strength. The recycled and washed concrete aggregate, despite having high absorption, showed satisfactory characteristics that fit the specifications of DNIT for use in asphalt concrete. Some properties of the hot mix asphalt presented a tendency of lineal correlation with the absorption of water of coarse aggregates. Increasing the water absorption of coarse aggregate caused a small decrease in the results of mechanical properties with respect to the reference mixture. However, all results were above the minimum established by DNIT standards, indicating a possible technical feasibility to perform asphalt concrete with the use of these wastes in order to contribute to the minimization of problems related to disposal.

Keywords: construction and demolition waste, recycling, HMA, paving, recycled aggregate.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	7
1.3 OBJETIVOS.....	8
1.3.1 Objetivo geral.....	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	8
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	9
2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	11
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	11
2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	12
2.3 HISTÓRICO DA RECICLAGEM.....	16
2.3.1 Experiência internacional.....	17
2.3.2 Experiência nacional	20
2.4 PROCESSO DE RECICLAGEM	22
2.5 COMPOSIÇÃO.....	24
2.6 NORMALIZAÇÃO	25
2.6.1 Normalização no Brasil.....	25

2.6.2	Normalização no exterior	32
2.7	AGREGADOS <i>VERSUS</i> PAVIMENTAÇÃO	34
2.7.1	Classificação dos agregados para uso em pavimentação	34
2.7.2	Consumo de agregados em pavimentação	36
2.7.3	Uso de agregados reciclados em pavimentação	38
2.7.3.1	Experiência nacional	40
2.7.3.2	Experiência internacional	43
3.	CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE	48
3.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	48
3.2	CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ) COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO	53
3.2.1	Experiência nacional	54
3.2.2	Experiência internacional	63
3.3	Método de dosagem marshall	68
4.	MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA E MÉTODOS	72
4.1	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)	73
4.2	AGREGADOS	74
4.2.1	Agregado reciclado de concreto	74
4.2.2	Agregado natural	76
4.2.3	Caracterização dos agregados	76
4.3	CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE	83
4.3.1	Dosagem Marshall	85
4.4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	95
4.4.1	Resistência à Tração estática por compressão diametral (DNER-ME 138/94)	96
4.4.2	Módulo de Resiliência por compressão diametral dinâmica (DNER-ME 133/94)	98

4.4.3 Fadiga por compressão diametral a tensões controladas de 20%, 30%, 40% e 50% do valor da RT	101
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	104
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	104
5.1.1 Análise granulométrica (DNER-ME 083/98)	104
5.1.2 - Absorção e Densidade do agregado graúdo (DNER-ME 081/98) e Densidade real do agregado miúdo (DNER-ME 084/95)	111
5.1.3 – Desgaste por abrasão <i>Los Angeles</i> (DNER-ME 035/98 e NBR-NM 51/2001).....	112
5.1.4 - Índice de forma do agregado graúdo (DNER-ME 086/94)	113
5.1.6 Adesividade ao ligante betuminoso (DNER-ME 078/94).....	114
5.1.7 Equivalente de areia do agregado miúdo (DNER-ME 054/97)	115
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	115
5.2.1 Volume de vazios (Vv%)	118
5.2.2 Vazios do agregado mineral (VAM%).....	120
5.2.3 Relação betume/vazios (RBV%).....	122
5.2.4 Vazios cheios de betume (VCB%).....	123
5.2.5 Estabilidade	124
5.2.6 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	126
5.2.7 Módulo de Resiliência.....	127
5.2.8 Vida de Fadiga	128
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	131
6.1 CONCLUSÕES.....	131
6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação dos modais no sistema de transportes em alguns países do mundo (Fonte: COPPEAD). Os dados foram calculados considerando apenas os modais rodoviário, aquaviário e ferroviário.....	6
Figura 2 – Volume movimentado pelo transporte rodoviário, em mil toneladas.....	6
Figura 3 – (a) Compactador giratório <i>Superpave</i> e (b) Compactador Marshall (automático).....	50
Figura 4 – Usina de reciclagem da Prefeitura Municipal de João Pessoa/PB (Fotos da autora, 2008).....	75
Figura 5 – Fotos dos ensaios de densidade, absorção, índice de forma e adesividade realizados no Laboratório de Pavimentação da UFPE (Fotos da autora, 2008).....	80
Figura 6 – Sequência do ensaio de desgaste por abrasão <i>Los Angeles</i>	81
Figura 7 – Laboratório da Usina de Asfalto Andrade Guedes localizada no município de Jaboatão dos Guararapes/PE (Fotos da autora, 2009).....	82
Figura 8 – Sequência de preparação das misturas pelo Método Marshall/Laboratório da Usina de Asfalto Andrade Guedes localizada no município de Jaboatão dos Guararapes/PE (Fotos da autora, 2009).....	87
Figura 9 – Identificação e medição dos corpos de prova (Fotos da autora, 2009).....	88
Figura 10 - Determinação do volume e densidade (Fotos da autora, 2009).....	88
Figura 11 – Controle qualitativo do CBUQ/Laboratório da Usina de Asfalto Lidermac município de Jaboatão dos Guararapes/PE (Fotos da autora, 2009).	92
Figura 12 – Sequência do ensaio de Extração do Betume pelo método DNER-ME 053/94/Laboratório da Usina de Asfalto Lidermac no município de Jaboatão dos Guararapes/PE (Fotos da autora, 2009).....	94
Figura 13 – Realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, conforme DNER-ME 138/94, no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC (Fotos da autora, 2009).....	97
Figura 14 – Estado de tensões geradas no ensaio de RTCD (Fonte: Specht, 2004). ...	98

Figura 15 – Equipamento para realização do ensaio de módulo de resiliência.....	99
Figura 16 – Ensaio de Módulo de Resiliência realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC (Fotos da autora, 2009).....	101
Figura 17 – Equipamento pneumático utilizado para os ensaios de fadiga e de módulo de resiliência.....	103
Figura 18 – Curvas granulométricas dos agregados pesquisados.....	105
Figura 19 - Curva granulométrica do Traço 1 com 0% de agregado graúdo reciclado (mistura de referência).....	107
Figura 20 – Curva granulométrica do Traço 2 com 25% de agregado graúdo reciclado.....	108
Figura 21 – Curva granulométrica do Traço 3 com 50% de agregado graúdo reciclado.....	109
Figura 22 – Curva granulométrica do Traço 4 com 75% de agregado graúdo reciclado.....	110
Figura 23 – Curva granulométrica do Traço 5 com 100% de agregado graúdo reciclado.....	111
Figura 24 – Densidade aparente dos agregados graúdos <i>versus</i> absorção.....	112
Figura 25 – Abrasão <i>Los Angeles</i> <i>versus</i> absorção de água dos agregados graúdos.....	113
Figura 26 – Volume de vazios (Vv) <i>versus</i> teor de ligante.....	119
Figura 27 – Volume de vazios <i>versus</i> absorção de água.....	120
Figura 28 – Vazios do agregado mineral (VAM) <i>versus</i> teor de ligante.....	121
Figura 29 – Relação Betume/Vazios <i>versus</i> teor de ligante.....	122
Figura 30 – Vazios cheios de betume (%) das cinco misturas estudadas, para 5% de teor de ligante.....	123
Figura 31 – Estabilidade <i>versus</i> absorção de água.....	125
Figura 32 – Vida de Fadiga a tensões controladas.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa de RCC gerada em algumas cidades do estado de São Paulo (Fontes: PINTO, 1999; SCHNEIDER, 2003; SINDUSCON/SP, 2005).....	14
Tabela 2 - Geração de RCC em países da União Européia (Fonte: EC, 1999).....	15
Tabela 3 - Percentual de reutilização ou reciclagem dos resíduos de construção em países da União Européia (Fonte: EC, 1999).	19
Tabela 4 – Usinas de reciclagem implantadas no Brasil até novembro de 2008 (Fonte: MIRANDA <i>et al.</i> , 2009).....	21
Tabela 5 – Composição de RCC no Brasil (Fonte: SILVA, 2009).....	24
Tabela 6 – Informações gerais sobre a gestão de RCC em alguns municípios brasileiros (Fonte: Ministério das Cidades/Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2005).....	27
Tabela 7- Destinatário dos resíduos (Fonte: SINDUSCON/SP, 2005).....	28
Tabela 8 – Requisitos gerais para agregados reciclados destinados à pavimentação, conforme a NBR 15116/04.....	30
Tabela 9 – Requisitos específicos para agregados reciclados destinados à pavimentação, conforme a NBR 15116/04.	31
Tabela 10 - Principais utilizações dos agregados na construção civil.....	37
Tabela 11 – Comparativo entre os resultados de diferentes pesquisas com agregados reciclados de concreto.	46
Tabela 12 - Variáveis que afetam as propriedades da mistura (Fonte: MONISMITH <i>et al.</i> , 1989).....	52
Tabela 13 – Resultados de caracterização dos agregados (Fonte: Guimarães <i>et al.</i> , 2005).....	57
Tabela 14 – Parâmetros volumétricos da mistura com agregado misto (Fonte: Guimarães <i>et al.</i> , 2005).....	57
Tabela 15 - Parâmetros volumétricos da mistura com agregado de CCR (Fonte: Guimarães <i>et al.</i> , 2005).....	58

Tabela 16 – Propriedades dos agregados reciclados utilizados na pesquisa de Ron <i>et al.</i> (2008).	59
Tabela 17 – Resultados do módulo de resiliência e da resistência à tração, a 25°C (Fonte: SILVA, 2009).	61
Tabela 18 - Características convencionais do CAP utilizado na pesquisa.	73
Tabela 19 – Ensaio de caracterização dos agregados utilizados na pesquisa.	77
Tabela 20 - Composição granulométrica dos agregados utilizados nas misturas, determinada conforme DNER-ME 083/98.	78
Tabela 21 – Propriedades e resultados obtidos.	79
Tabela 22 – Faixas granulométricas do concreto asfáltico - Norma DNIT 31/2006 - ES (DNIT, 2006).	85
Tabela 23 – Norma DNIT 031/2006 – ES.	92
Tabela 24 - Norma DNIT 031/2006 – ES.	93
Tabela 25 – Resultados dos ensaios de caracterização realizados nos agregados naturais e reciclados desta pesquisa.	104
Tabela 26: Granulometria dos agregados naturais e reciclados utilizados nas misturas estudadas.	105
Tabela 27 – Traço 1 com 0% de agregado graúdo reciclado (T _{0%} - mistura de referência).	106
Tabela 28 – Traço 2 com 25% de agregado graúdo reciclado (T _{25%}).	107
Tabela 29 – Traço 3 com 50% de agregado graúdo reciclado (T _{50%}).	108
Tabela 30 – Traço 4 com 75% de agregado graúdo reciclado (T _{75%}).	109
Tabela 31 – Traço 5 com 100% de agregado graúdo reciclado (T _{100%}).	110
Tabela 32 – Especificações da norma DNIT 031/2006 – ES.	116
Tabela 33 - Resultados encontrados no controle qualitativo das cinco misturas estudadas, com 5% de ligante.	117
Tabela 34 – Média ponderada da absorção dos agregados graúdos que compõem os traços das cinco misturas estudadas para 5% de ligante.	119

Tabela 35 – Índice de forma e agregados graúdos utilizados nas misturas estudadas.	124
Tabela 36 – Resultados dos ensaios de estabilidade, fluência, RT e MR.	125
Tabela 37 - Módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral das misturas estudadas (25°C).	126
Tabela 38 – Vida de fadiga.	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AB: Asfalto Borracha

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC: *Asphalt Cement*

ACC: *Association of Corporate Counsel*

AGR: Agregado graúdo reciclado

AI: *Asphalt Institute*

ALT-MAT: *Alternative Materials in Road Construction*

ANOVA: Análise de Variância

ARC: Agregado reciclado de concreto

ARM: Agregado reciclado misto

ARRA: *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*

ASTM: *American Society of Testing and Materials*

BBR: *Bending Beam Rheometer*

°C: Graus Celsius

CA: Concreto Asfáltico

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CCR: Concreto Compactado a Rolo

CEC: *Community European Committee*

CETEM: Centro de Tecnologia Mineral

CNT: Confederação Nacional do Transporte

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPPEAD: Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração da UFRJ

cp: corpo de prova

CPA: Camada Porosa de Atrito

DERSA: Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DET: Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará

DMT: Densidade Máxima Teórica

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (extinto)

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (antigo DNER)

DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral

DSR: *Dynamic Shear Rheometer*

EC: *European Commission*

EPA: *The U.S. Environmental Protection Agency*

ES: Especificação de ensaio

f_{ck} : resistência característica do concreto, aos 28 dias, aos esforços de compressão

FDOT: *Florida Department of Transportation*

FHWA: *Federal Highway Administration*

GEIPOT: Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes

h: hora

IBP: Instituto Brasileiro do Petróleo

IA: Instituto do Asfalto

IME: Instituto Militar de Engenharia

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

km: quilômetros

l: litro

LMP: Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará

LUBNOR: Lubrificantes do Nordeste

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

m³: metro cúbico

ME: Método de Ensaio

MPa: Mega Pascal, unidade de medida padrão das normas técnicas

MR: Módulo de resiliência

NBR: Norma Brasileira

OECD: *Organization for Economic Co-operation and Development*

PAC: Programa de Aceleração do Crescimento

PETROBRAS: Petróleo Brasileiro S.A.

PF: Ponto de Fulgor

PBQP-H: Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat

PMSP: Prefeitura Municipal de São Paulo

RBV: Relação Betume-Vazios

RCC: Resíduos de Construção Civil

RCD: Resíduos de Construção e Demolição

REDUC: Refinaria de Duque de Caxias

REFAP: Refinaria Alberto Pasqualini S/A

REGAP: Refinaria Gabriel Passos

REMAN: Refinaria de Manaus

REPAR: Refinaria Presidente Getúlio Vargas

REPLAN: Refinaria do Planalto Paulista

REVAP: Refinaria Henrique Lage

RLAM: Refinaria Landulpho Alves

RT: Resistência à tração por compressão diametral

RTFOT: *Rolling Thin Film Oven Test*

s: segundo

SHRP: *Superior Highway Research Program*

SIQ: Sistema de Qualificação de Empresas de Serviços e Obras (construtoras)

SMA: *Stone Matrix Asphalt*

SUPERPAVE: *Superior Performance Asphalt Pavements*

t: toneladas

T: Temperatura

TC: Tensão Controlada

UFAL: Universidade Federal de Alagoas

UFC: Universidade Federal do Ceará

UFPE: Universidade Federal de Pernambuco

UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

USP: Universidade de São Paulo

UTS: *University of Technology Sydney (Australia)*

VAM: Vazios do Agregado Mineral

VCB: Vazios Cheios de Betume

Vv: Volume de vazios

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A construção civil, apesar de ser reconhecidamente uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento sócio-econômico, apresenta-se ainda como grande geradora de impactos ambientais, tanto pelo consumo dos recursos naturais, quanto pela modificação da paisagem e geração de elevado volume de resíduos. O setor chega a consumir até 75% de recursos naturais (LEVY, 1997; PINTO, 1999; JOHN, 2000).

Diante desta problemática, o resíduo de construção civil (RCC) foi classificado como resíduo prioritário pelo *Community European Committee* (CEC) (RUCH *et al.*, 1997a) e sua reciclagem tem sido estudada com afinco por vários países desenvolvidos há algumas décadas. O relatório *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) produzido em 2007 pela Organização das Nações Unidas (ONU), recomenda o desenvolvimento e a divulgação de novas tecnologias e políticas de gerenciamento que contribuam para a redução da geração de resíduos.

Em países como Japão, França, Inglaterra, Itália, Holanda, Alemanha, Bélgica, EUA e Canadá, a reciclagem é uma prática consolidada e existem milhares de usinas de reciclagem de RCC instaladas. Os governos locais dispõem de leis que exigem o uso de materiais reciclados na construção e em serviços públicos. Segundo Momber (2002), nos países da comunidade européia, em média 60% do RCC gerado (aproximadamente 180 milhões de toneladas) está sendo reciclado correntemente. No entanto, mesmo dentro da Comunidade Européia, existem diferenças bastante significativas. Enquanto países como Espanha, Portugal, Grécia e Irlanda reciclam menos de 5% do RCC gerado, o Reino Unido e a Finlândia reciclam 45% e a Holanda recicla em média 90% (EC, 2000).

A Espanha e os Estados Unidos são exemplos de países que implantaram programas governamentais de incentivos com o objetivo de diagnosticar os setores produtores de resíduos, suas fontes geradoras, tipos e quantidades, subsidiando o aproveitamento através da reciclagem. Alguns países que possuem pouco material primário, como Bélgica, Holanda e Dinamarca, reciclam mais de 90% dos RCC e ainda assim, importam resíduos de construção da Inglaterra e areia da Sibéria (CIOCCHI, 2003).

No Brasil, somente nas últimas décadas o problema começou a ser percebido, quando as consequências causadas pelo mau gerenciamento destes resíduos passaram a influenciar

negativamente na qualidade de vida e na saúde da população. Frequentemente, o RCC é disposto clandestinamente em locais inadequados como córregos, margens de rios, ruas, terrenos baldios, etc. Esta prática obstrui os sistemas de drenagem com o entupimento de galerias e bueiros, contribuindo com alagamentos e enchentes, tornando-se focos de seres transmissores de doenças, o que, conseqüentemente, onera as contas públicas.

É quase impossível calcular o custo e os prejuízos sociais, econômicos e ambientais gerados por tal prática. Tanto que os resíduos de construção são um dos maiores desafios enfrentados pelas prefeituras e, atualmente, representam mais de 50% da massa total de resíduos sólidos urbanos. Em algumas cidades esse total atinge 80%. Calcula-se que são gerados, no país, em média, 500 kg/hab.ano de RCC (PINTO, 1999).

Como regra geral, quanto maior a cidade, mais grave é a questão dos resíduos de construção (JOHN, 2000; AGOPYAN, 2003). Segundo Schneider (2003) *apud* Motta (2005), na cidade de São Paulo, a geração diária de resíduos de construção no ano de 2003 foi estimada em 16.000 toneladas/dia e os gastos no sistema de coleta, transporte e destinação final alcançaram mais de R\$ 263 milhões¹ entre os anos de 1993 e 2002.

Apesar do aumento na quantidade de usinas² de reciclagem, após o ano de 2002, com a resolução nº 307 do CONAMA, o percentual de reciclagem ainda é baixo. Atualmente existem pelo menos 47 usinas de reciclagem de RCC no Brasil. Se todas estivessem operando em sua capacidade nominal, teríamos, no máximo, 4,5% do RCC gerado sendo reciclado. No entanto, este percentual é ainda menor, visto que algumas destas usinas estão desativadas e a maioria não atinge de forma contínua sua capacidade nominal (MIRANDA *et al.*, 2009).

Por determinação da Resolução CONAMA nº 307/2002 que visa disciplinar as atividades relacionadas aos resíduos da construção civil, ao classificá-los e estabelecer possíveis destinos para dispô-los, criando instrumentos para superar um quadro constante de degradação na sua deposição irregular e atribuindo responsáveis. A partir de 2004, todos os municípios brasileiros estão obrigados a elaborar um Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, compreendendo: a) Programa Municipal de Gerenciamento para geradores de pequenos volumes; b) Projetos de Gerenciamento em obra, caracterizando os resíduos e

¹ Valor vigente no ano de 2002.

² Até o ano de 2004, existiam apenas 14 usinas de reciclagem de resíduos classe A no Brasil (NUNES, 2004 *apud* SILVA, 2009).

indicando procedimentos para triagem, acondicionamento, transporte e destinação, para aprovação dos empreendimentos destes geradores de grandes volumes. No caso dos municípios, o prazo para elaboração do Plano foi até janeiro de 2004 e implantação até julho de 2004. Para os geradores, o prazo para a elaboração e implantação iniciou-se em janeiro de 2005.

Além desta resolução nº 307/2002 do CONAMA, o PBQP-H (Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat), através do Sistema de Qualificação de Empresas de Serviços e Obras (SIQ - Construtoras) exige que as construtoras indiquem um destino adequado para todos os resíduos sólidos e líquidos produzidos pela obra, como condição de qualificação no nível "A". Como forma de contribuição, as instituições financeiras exigem tal qualificação como critério para seleção das empresas interessadas em obter recursos.

Com vistas no desenvolvimento sustentável, muitos pesquisadores vêm buscando alternativas para minimizar os problemas decorrentes da geração e disposição final dos resíduos de obras. Por meio da reciclagem, novas matérias-primas são geradas podendo substituir as naturais, não-renováveis, gerando economia energética e de recursos naturais, além da diminuição nos impactos negativos e nos custos. No entanto, o reaproveitamento e a reciclagem dos RCC ainda são pouco expressivos, evidenciando a necessidade de mais estudos para a elaboração de leis, normas técnicas e medidas que podem contribuir significativamente na redução deste passivo ambiental (ANGULO *et al.*, 2003).

O uso de agregados reciclados de RCC nas camadas de base e sub-base de pavimentos, no país, data de meados da década de 80. As pesquisas anteriormente realizadas (TRICHÊS; KRYCKYJ, 1999; MOTTA, 2005; LEITE, 2007) analisaram as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos agregados reciclados de construção civil para camadas de base, sub-base e reforço de pavimentos, demonstrando que os mesmos podem ser empregados, dentre outras aplicações, em substituição aos materiais naturais convencionalmente utilizados com consequente redução nos impactos ambientais e custos das obras. Segundo a tabela de preços da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP), a execução de 1 m³ da camada de base de um pavimento executada com agregado reciclado custa, em média, 18% a menos que o mesmo serviço se executado com o material convencional (brita graduada natural). Ainda assim, o mercado é pequeno.

Em países onde já existe um conhecimento consolidado sobre o assunto, estes agregados vêm sendo amplamente utilizados nas camadas de base e sub-base dos pavimentos, por ser um material que comprovadamente apresenta boa resistência e baixa expansão.

Por outro lado, a infraestrutura rodoviária é um dos elementos de maior importância para a economia de um país, principalmente em uma nação com dimensões continentais como o Brasil. É um meio pelo qual grande parcela dos bens econômicos produzidos é transportada. Atualmente, o transporte rodoviário brasileiro detém aproximadamente 96,2% da matriz de transporte de passageiros e 61,8% da matriz de transporte de cargas (CNT, 2006).

O aumento de estradas pavimentadas bem como a melhoria na conservação das já existentes é fator condicionante para a queda nos custos operacionais dos transportes e consequente diminuição no preço final de bens e serviços transportados, o que elevará os produtos brasileiros a uma maior competitividade no exterior. Deve-se ressaltar ainda que, por ano no Brasil, ocorrem cerca de 40.000 mortes por acidente de trânsito (GUANDALINI, 2007).

A precariedade das rodovias brasileiras diminui a vida útil das peças dos veículos, aumenta o tempo de viagem, ocasiona acidentes e, no caso do transporte de mercadorias, encarece o frete. Veículos que circulam em rodovias com mau estado de conservação elevam em 58% o consumo de combustível, 38% o custo de manutenção dos veículos, 38% o custo do frete, 50% o número de acidentes e podem até dobrar o tempo de viagem. Devido à precariedade, estas rodovias possuem elevado custo de manutenção da infraestrutura (DNER, 1998 *apud* REIS, 2002). Todos os prejuízos decorrentes das péssimas condições das estradas brasileiras são repassados para o preço final dos produtos, limitando a competitividade das mercadorias nacionais no mercado externo.

Segundo GEIPOT (2000), o Brasil apresenta apenas 9,5% da malha rodoviária pavimentada, equivalente a cerca de 165.000 km dos mais de 1.720.000 km existentes. Os últimos dados publicados pela CNT (2011) indicam um pequeno aumento na quantidade de pistas pavimentadas, 212.618 km, que representam aproximadamente 13,4% da extensão total, dos quais, 61.961 km de rodovias federais, 123.830 km de rodovias estaduais e 26.827 km de rodovias municipais.

Uma pesquisa realizada em 2004 pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), abrangendo toda a malha federal pavimentada, constatou que: 56,1% dos 74.681 km avaliados estavam em deficiente, ruim ou péssimo estado de conservação. Em 2005, a situação permanecia semelhante, 54,6% dos 81.944 km apresentavam os três estados de conservação

indesejáveis. Na pesquisa realizada em 2006, classificou-se 54,5% dos 84.382 km de pavimentos avaliados nas categorias de mau estado de conservação. Os dados mais recentes são da Pesquisa CNT de 2009 e indicam que, dos 89.552 km de rodovias pavimentadas avaliadas, 69,0% apresentam algum tipo de deficiência na geometria da via, sinalização e/ou no próprio pavimento.

Em termos urbanos, a situação das cidades não é muito diferente, a maior parte das ruas está sem pavimentação ou cascalhada, principalmente nas periferias ou nos bairros mais pobres. A falta de investimentos na infraestrutura de transportes nas cidades acarreta o uso cada vez maior do transporte individual, o que satura as vias urbanas e gera imensos congestionamentos, agravando os níveis de poluição atmosférica devido à emissão de gases dos escapamentos. É visível a crise da mobilidade urbana, principalmente nas grandes capitais brasileiras (CNT, 2011).

Dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes indicam que aproximadamente 88% da malha rodoviária nacional não é pavimentada (DNIT, 2005). Desses 1.414.000 km sem pavimentação, um montante de 1.282.000 km pertencem à rede municipal (COPPEAD, 2007).

Os dados da pesquisa realizada pela CNT em 2006 revelam uma pequena melhora com relação ao ano anterior: a extensão de rodovias em condições de rolamento ruim ou péssima totalizou 15.852 km. Os estados com melhores resultados foram o Rio Grande do Sul, com 65,5% dos pavimentos em ótima ou boa condição de rolamento e São Paulo com 75% dos pavimentos avaliados em ótimas condições.

A infraestrutura de transportes é vital e imprescindível para o bem estar e desenvolvimento sócio-econômico. Nos países em desenvolvimento, o transporte de passageiros e de bens é feito em sua grande maioria por veículos de passeio, coletivos, caminhões e carretas.

As rodovias brasileiras desempenham um inquestionável papel no desenvolvimento econômico do país, visto que o transporte rodoviário é significativamente mais representativo que os modais ferroviário, aéreo e aquaviário (Figura 1). Segundo a CNT (2011), o transporte rodoviário brasileiro no ano de 2009 deteve aproximadamente 61,1%, o que correspondeu a 420,6 bilhões de toneladas-quilômetro – TKM, com a movimentação de 1,1 bilhão de toneladas de cargas por rodovias.

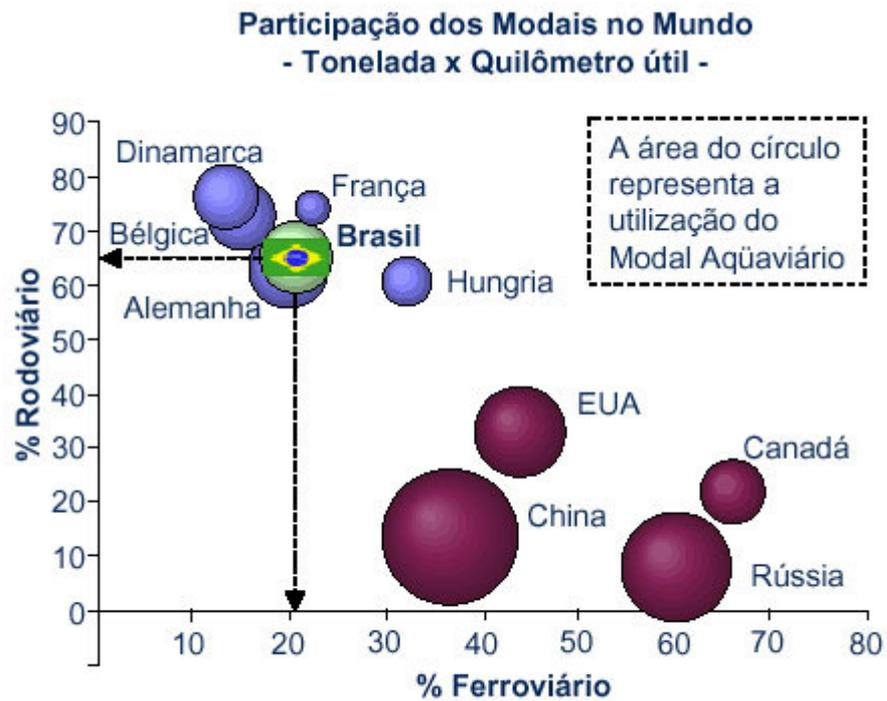
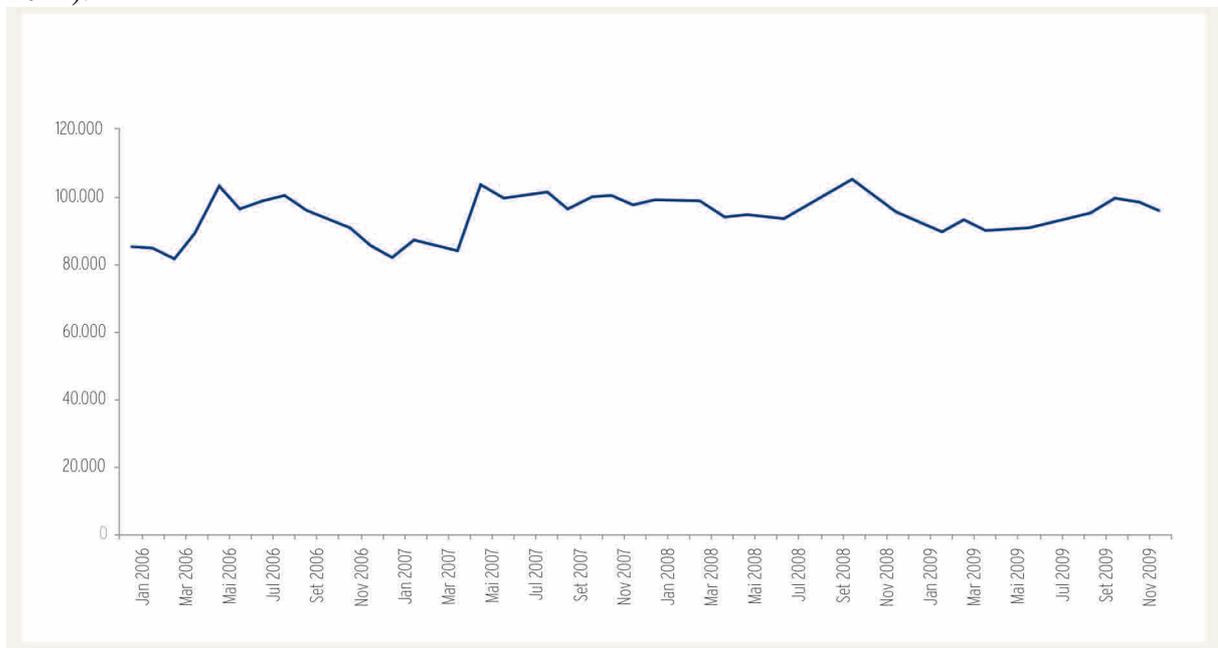


Figura 1 – Participação dos modais no sistema de transportes em alguns países do mundo (Fonte: COPPEAD). Os dados foram calculados considerando apenas os modais rodoviário, aquaviário e ferroviário.

A Figura 2 apresenta a movimentação de cargas por rodovias entre 2006 e 2009 (Fonte: CNT, 2011).



Fonte: IDET (2010)
Elaboração: CNT

Figura 2 – Volume movimentado pelo transporte rodoviário, em mil toneladas.

A ineficiência do sistema logístico de transporte no Brasil causa um grave desequilíbrio, com consequências que podem ser observadas nos setores produtivos econômicos, na baixa competitividade dos produtos brasileiros no mercado externo e conseqüente menor geração de divisas, nas dificuldades para a integração física das cidades, estados e até países vizinhos, na queda da qualidade dos serviços de transporte oferecidos à população, nos custos elevados embutidos nos valores dos bens de consumo e na alta emissão de gases poluentes emitidos no meio ambiente. Nesse contexto, o atual panorama nacional aponta para uma necessidade de estruturação e melhorias significativas na infraestrutura de transportes, que não está adequada para um país com as dimensões e potencialidades do Brasil, de modo a atender satisfatoriamente às necessidades inerentes ao crescimento e ao progresso (CNT, 2011).

Por outro lado, as obras de pavimentação conhecidamente demandam uma grande quantidade de agregados. Por isto, a necessidade de projetos mais sustentáveis para a construção de rodovias está se tornando prioridade.

O ALT-MAT (*Alternative Materials in Road Construction*) é o resultado da união de um grupo de países europeus que, durante aproximadamente dois anos, esteve reunido para estudar, em laboratório e em campo, materiais alternativos para uso em pavimentação. Dentre outras conclusões, o grupo chegou a um consenso que o desempenho em campo, em alguns casos, é melhor que a previsão laboratorial. Além disto, os parâmetros dos testes aplicados devem seguir sempre as características locais como, por exemplo, o clima e experiências adquiridas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Considerando o exposto no item anterior, fica claro que existe uma real necessidade de se reciclar os RCC gerados, de se aumentar as alternativas de aplicação destes agregados reciclados e de se melhorar a qualidade e a quantidade de vias pavimentadas no país.

Sendo assim, este trabalho tem sua importância e justificativa comprovada, pois, através da avaliação das propriedades mecânicas de revestimentos asfálticos tipo CBUQ feitos com agregados graúdos reciclados de resíduos de concreto, poderá apresentar uma nova alternativa para a minimização dos problemas descritos, com as vantagens de poder reduzir o custo do revestimento asfáltico e o impacto ambiental. Além disso, deve ser considerado que são escassos os estudos já desenvolvidos no país com este enfoque.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho mecânico de revestimento asfáltico do tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) com o uso de agregados graúdos lavados obtidos pela reciclagem de resíduo de concreto.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar misturas asfálticas do tipo CBUQ, com diferentes proporções de agregado reciclado de concreto, avaliando o efeito da substituição dos agregados graúdos naturais pelos reciclados nos parâmetros volumétricos da metodologia Marshall;
- Avaliar o comportamento mecânico das misturas estudadas através dos ensaios de: resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR) e vida de fadiga à tensão controlada;
- Definir se existe viabilidade de utilização deste tipo de agregado reciclado na produção de CBUQ.

1.4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Este trabalho consiste no estudo do agregado reciclado de concreto para uso em concreto asfáltico e na avaliação das propriedades volumétricas e mecânicas destas misturas. A pesquisa fundamenta-se em três partes distintas e correlacionadas entre si:

1. Análise das propriedades dos agregados naturais e reciclados de concreto: granulometria, módulo de finura, absorção de água, massa específica, adesividade ao ligante betuminoso, abrasão *Los Angeles*, índice de forma, equivalente de areia e durabilidade/sanidade;
2. Escolha do método de dosagem e determinação da faixa granulométrica e dos traços das cinco misturas estudadas. Optou-se pelo concreto asfáltico (CA), também chamado de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), por ser o mais utilizado nas rodovias brasileiras. A metodologia de dosagem adotada foi a Marshall, por ser a mais difundida e utilizada no Brasil e em todo o mundo. Nesta etapa foram realizados

todos os ensaios inerentes à dosagem Marshall, avaliação de importantes propriedades volumétricas das misturas (densidades aparentes e teóricas, V_v, VAM, VCB, RBV) e determinação da estabilidade e fluência;

3. Por fim, avaliação das propriedades mecânicas (resistência à tração por compressão diametral - RT, módulo de resiliência - MR e fadiga a tensões controladas) das cinco misturas de concreto asfáltico.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação de mestrado está organizada em sete capítulos.

Inicialmente, o capítulo 1 INTRODUÇÃO apresenta uma visão geral sobre a problemática do elevado volume de resíduos gerados pelo setor da construção civil no Brasil e no mundo e a importância do desenvolvimento de pesquisas e políticas públicas para o melhor aproveitamento destes resíduos. Os subitens deste primeiro capítulo citam o problema e relevância da pesquisa, a justificativa do estudo, os objetivos, o desenvolvimento e a organização do trabalho.

Na sequência, no capítulo 2 são abordados temas relacionados aos RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, tais como: histórico, métodos de reciclagem, agregados reciclados, normas regulamentadoras e a sua utilização em pavimentação relatando experiências nacionais e internacionais.

O capítulo 3 detalha simplificada, através de uma breve revisão bibliográfica, o CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE, com a influência dos materiais constituintes em suas propriedades e desempenho, o MÉTODO DE DOSAGEM MARSHALL e características dos revestimentos asfálticos feitos com agregados reciclados.

O capítulo 4 apresenta o PROGRAMA EXPERIMENTAL, descrevendo os MATERIAIS E MÉTODOS utilizados nesta pesquisa, desde os procedimentos adotados na coleta, e as técnicas experimentais adotadas para a realização dos ensaios para caracterização dos materiais, dosagem Marshall e a caracterização mecânica das misturas asfálticas através dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR) e vida de fadiga a tensões controladas. Nesta etapa foram determinadas quais as variáveis de resposta que seriam relevantes e adequadas aos objetivos propostos, delimitando o “universo” a ser pesquisado.

O capítulo 5 compreende a APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS dos ensaios realizados nos materiais e no concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Para uma melhor visualização e interpretação, os resultados são apresentados em forma de gráficos e tabelas.

Por fim, o capítulo 6 traz as CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Neste capítulo são apresentados os tópicos relacionados aos resíduos de construção civil, à reciclagem destes resíduos, legislação, normas e uso destes agregados em pavimentação.

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O crescimento e o desenvolvimento da população mundial têm interferido de forma desrespeitosa na natureza, desencadeando um grande número de desastres e catástrofes ambientais. Desde o início do século 20, a população urbana passou rapidamente de 15% para 50%, o que gerou uma urbanização desordenada, com aumento significativo da necessidade de bens de consumo e déficit habitacional. Conseqüentemente, o setor de construção civil acompanhou este crescimento.

No entanto, os processos produtivos não se modernizaram na mesma velocidade e são responsáveis por sérios impactos ambientais. No modelo de produção atual, seja para bens de consumo duráveis ou não-duráveis, normalmente faz-se uso de matérias-primas naturais não-renováveis. Com o incremento do consumo decorrente da intensa industrialização e do crescimento populacional, os resíduos transformaram-se em graves problemas urbanos, principalmente a partir dos anos 80. Considerando-se volume e massa gerados, o gerenciamento tornou-se oneroso e complexo. O aumento populacional em centros urbanos ocasionou a ocupação e valorização das áreas das cidades e a escassez de locais para deposição dos resíduos (JOHN, 2000).

Durante a ECO-92 e na definição da Agenda 21³, o principal destaque foi a necessidade urgente da implementação de sistemas adequados de gestão ambiental dos resíduos sólidos (GÜNTHER, 2000).

O relatório *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007), elaborado pela Organização das Nações Unidas (ONU), indica que os resíduos sólidos e líquidos em geral são responsáveis por 2,8% da emissão de CO₂ e de outros gases que contribuem para o

³ A Agenda 21 “é um documento resultante das discussões ocorridas na Rio-92, onde nasceu o movimento denominado construção sustentável, que visa o aumento das oportunidades ambientais para as gerações futuras e que consiste em uma estratégia ambiental com visão holística” (SCHENINI *et al.*, 2004, p.2).

aquecimento global. Em função destes dados, o relatório recomenda a adoção de políticas de gerenciamento dos resíduos que contribuam para reduzir a geração e aumentar a reciclagem dos mesmos, através do desenvolvimento e difusão de novas tecnologias.

De acordo com Hill *et al.* (2001), para manter os níveis de desenvolvimento e construção e, ao mesmo tempo, reduzir o uso de agregados naturais e de impactos ambientais, há duas opções: otimizar o uso dos recursos naturais e/ou empregar materiais alternativos (os agregados reciclados, por exemplo).

As recentes pesquisas visando um desenvolvimento sustentável têm como principal pré-requisito a redução do consumo de matérias-primas naturais não-renováveis através do uso de reciclados. As novas tecnologias podem indicar alternativas possíveis, desde que comprovem a efetiva durabilidade, o desempenho técnico satisfatório, um ciclo produtivo viável, contínuo, ambientalmente seguro e com um custo atrativo.

2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil é reconhecidamente uma das mais importantes para a transformação e melhoria da qualidade de vida nas cidades, geração de empregos e desenvolvimento econômico-social. Representa um dos setores de maior vulto na sociedade. Na Comunidade Européia, chega a contribuir com aproximadamente de 25% do PIB, e envolve até 30 milhões de operários sendo o maior setor econômico (SJÖSTROM, 2000). Os dados da FIESP, citados por John (2000), indicam que no Brasil o setor corresponde a 14,5% do PIB nacional.

Contraditoriamente, a construção civil é responsável por grandes impactos ambientais, por ser um dos maiores agentes de degradação do meio ambiente. Pesquisas anteriores (LEVY, 1997; PINTO, 1999; JOHN, 2000) afirmam que a construção civil consome até 75% de recursos naturais, fazendo uso de muita energia no processo de extração e produção de matérias-primas, montagem e uso dos produtos, demolições, etc. O resultado final desta cadeia produtiva é um elevado volume de resíduos lançados na natureza, muitas vezes em locais inadequados. O seu grande desafio é implantar métodos suficientemente capazes de conciliar a sua atividade produtiva com uma representativa diminuição na geração de RCC. O aproveitamento destes resíduos poderá levar o setor a um desenvolvimento mais sustentável e menos agressivo ao meio ambiente.

Sabe-se que os problemas ocasionados pelos RCC não serão solucionados com ações isoladas e que, do ponto de vista da sustentabilidade na indústria da construção civil, é fundamental o incentivo a não geração e à redução destes resíduos. O setor deve tentar fechar o seu ciclo produtivo de forma a minimizar a geração de RCC, o desperdício e a entrada de matéria-prima não renovável, priorizando o consumo dos reciclados. O conceito é multidisciplinar, envolve também mudanças culturais, educação ambiental e visão sistêmica (ZWAN, 1997; JOHN, 2000).

Um estudo publicado por Schneider (2003) indicou que 70% dos resíduos de obras são descartados em locais clandestinos. Quando levados aos aterros, os RCC são os grandes responsáveis pelo esgotamento destes, podendo chegar a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1999). Para piorar este cenário, as grandes cidades brasileiras possuem pouquíssimos espaços disponíveis para o descarte de resíduos e a exploração/extração de recursos naturais está cada vez mais distante destas cidades.

Calcula-se que sejam geradas 68,5 milhões de toneladas de resíduos de construção anualmente no país (ANGULO *et al.*, 2003). Segundo Pinto (1999), estima-se em média 0,52 toneladas de RCC por habitante e por ano, ou 150 kg/m² construído, o que representa de 54% a 70% da massa dos resíduos sólidos urbanos. Do total de resíduos sólidos coletados nas médias e grandes cidades brasileiras, dois terços em massa são constituídos de RCC, o que onera os custos das construções e dos serviços públicos de modo geral (JOHN, 2000; AGOPYAN, 2003).

No município de São Paulo, no ano de 2003, estimou-se uma produção diária de RCC em torno de 16.000 toneladas. No entanto, apenas 30% deste total gerado foi levado aos aterros públicos, indicando o descarte irregular de 70% do montante (SCHNEIDER, 2003).

De acordo com a Superintendência de Limpeza Urbana (SLU) de Belo Horizonte/Minas Gerais, em 2008, foram recolhidas em média 741.400 toneladas de RCC. Deste total, 78.000 toneladas coletadas em locais clandestinos. Segundo o setor de estatística da SLU, o custo de recolhimento do RCC disposto em locais clandestinos, em abril de 2009, era de R\$ 23,53/tonelada para coletas mecanizadas e R\$ 99,13/tonelada para coletas manuais, em locais de difícil acesso para as máquinas.

No ano de 2009, o gasto com a remoção de RCC das vias urbanas da cidade de Salvador/Bahia, foi de aproximadamente R\$ 20 milhões, fora os custos com tratamento de

doenças provocadas por vetores, desobstrução de galerias, desordenamento urbano, etc. (MELO, 2010).

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2007), indicam que são coletadas mais de 7.200 toneladas/dia de lixo urbano no município de Fortaleza/Ceará. De acordo com a Prefeitura Municipal, calcula-se que 30% deste total, 2.160 toneladas/dia, é constituído por RCC oriundos de obras das grandes construtoras que atuam na capital cearense (LOPES, 2007).

Miranda (2007) estimou uma quantidade de resíduos de construção civil em torno de 1.500 toneladas/dia para o Recife/Pernambuco.

O aproveitamento dos agregados reciclados em novas obras, além de diminuir o descarte em locais inadequados e suas consequências indesejáveis, contribui para a redução de áreas públicas destinadas à deposição dos resíduos.

A Tabela 1 a seguir apresenta a estimativa da massa de RCC gerada em algumas cidades paulistas.

Tabela 1 - Massa de RCC gerada em algumas cidades do estado de São Paulo (Fontes: PINTO, 1999; SCHNEIDER, 2003; SINDUSCON/SP, 2005).

Municípios - SP	Fonte	Geração diária (t)	Geração RCC Per capita [kg/ano]	Participação em relação aos resíduos sólidos urbanos (%)
São Paulo	I&T 2003	17.240	499	55
Guarulhos	I&T 2001	1.308	—	50
Diadema	I&T 2001	458	—	57
Campinas	PMC 1996	1.800	—	64
Piracicaba	I&T 2001	620	—	67
São José dos Campos	I&T 1995	733	471	67
Ribeirão Preto	I&T 1995	1.043	714	70
Jundiaí	I&T 1997	712	758	62
São José do Rio Preto	I&T 1997	687	662	58
Santo André	I&T 1997	1.013	—	54

Fontes: PINTO, 1999; SCHNEIDER, 2003; SINDUSCON/SP, 2005.

O problema do elevado volume de resíduos de construção civil (RCC) não é uma realidade apenas brasileira, é mundial. No entanto, apesar da escassez de dados relacionados à geração de RCC no Brasil, os números disponíveis mostram que a indústria da construção civil brasileira possui uma significativa taxa de desperdício de materiais. Comparando-se os dados da Tabela 1 com a Tabela 2, pode-se observar que algumas cidades brasileiras apresentam geração de RCC, *per capita*, superior a de muitos países inteiros da Europa.

A Tabela 2 a seguir mostra a realidade dos países da União Européia.

Tabela 2 - Geração de RCC em países da União Européia (Fonte: EC, 1999).

País	População aprox. [x 10 ³ hab.]	Geração RCC [x 10 ³ ton/dia]	Geração RCC <i>Per capita</i> [kg/ano]
Alemanha	82.012	961,5	3.658
Bélgica	10.170	111,1	3.408
Áustria	8.068	84,6	3.272
Dinamarca	5.275	34,3	2.030
Finlândia	5.132	30,3	1.842
Holanda	15.567	64,4	1.291
Reino Unido	58.902	214,7	1.137
Suécia	8.844	18,9	667
Irlanda	3.652	6,1	521
França	58.492	75,6 ^(*)	403
Itália	57.461	64,1 ^(*)	348
Espanha	39.299	41,7 ^(*)	331
Portugal	9.934	9,6 ^(*)	302
Grécia	10.487	6,4 ^(*)	191

Fonte: EC, 1999.

(*) Nestes valores não são considerados resíduos de pavimentação, escavação, vegetação e tubulações de drenagem, água, gás ou eletricidade.

A geração de resíduos *per capita* na Alemanha, Bélgica, Áustria e Dinamarca é bem superior quando comparada com a Suécia, Irlanda, França, Itália, Espanha, Portugal e Grécia. Mesmo levando-se em conta que os quatro últimos países citados excluem alguns tipos de resíduos do montante apresentado na Tabela 2.

Dados de pesquisas anteriores indicam que:

- na Alemanha são produzidos cerca de 33 milhões de toneladas/ano de RCC (RUCH *et al.*, 1997b);
- na Inglaterra a geração de resíduos de construção chega a 70 milhões de toneladas/ano (FREEMAN; HARDER, 1997);

- na França, de 20 a 25 milhões de toneladas/ano (BOILEAU, 1997).

Os três países citados acima estão entre os mais populosos da Europa.

No Canadá, o volume de RCC representa 35% do total de resíduos produzidos, o que equivale a 11 milhões de toneladas/ano (ACC, 2001).

Nos Estados Unidos, a geração de resíduos em 1996 foi de aproximadamente 136 milhões de toneladas, que corresponde a 1,27 kg por habitante por dia. Neste cálculo, os resíduos de pontes e pavimentos não foram considerados. Aproximadamente 35% a 45% deste montante é depositado em aterros legais e 20% a 30% dos resíduos são reaproveitados ou reciclados. Os resíduos de concreto, misturas asfálticas, madeiras e metais estão entre os mais reciclados e reaproveitados neste país (EPA, 1998).

Na região chamada de Nova Gales do Sul, que abrange as principais cidades australianas (Sidney, Melbourne e Camberra – capital da Austrália), estima-se que foram gerados 1,56 milhões de toneladas de RCC no ano de 1997, cerca de 6.000 toneladas/dia (UTS, 1999).

Segundo Poon (1997), em Hong Kong (China), os levantamentos indicam que no ano de 1991 a geração diária chegou a 22.000 toneladas, das quais 16.000 toneladas foram dispostas em aterros, vias públicas e canais de deposição marinha.

Diante desta realidade no Brasil e no mundo, a reciclagem de RCC surge como uma ferramenta indispensável para a sustentabilidade do setor construtivo, disponibilizando agregados mais baratos para as obras e consequente diminuição da exploração das jazidas naturais, além da preservação do meio-ambiente e melhoria da qualidade de vida da população.

2.3 HISTÓRICO DA RECICLAGEM

Existem registros de aproveitamento dos resíduos de demolição desde tempos remotos (VON STEIN, 2000). Os antigos romanos moíam e aproveitavam os materiais cerâmicos como tijolos, telhas e louças para aproveitamento como material pozolânico (SANTOS, 1975).

Segundo Levy (2002) *apud* Melo (2010), em 1928 foram iniciadas pesquisas na Europa sobre o comportamento de concretos com agregados reciclados. Porém, somente após o término da Segunda Guerra Mundial, diante da necessidade imediata de remoção dos resíduos para

reconstrução das cidades, o Japão e a Europa utilizaram os RCC em larga escala (NATAATMADJA; TAN, 2001).

Segundo Santos (2007), com o término da Segunda Guerra Mundial, existiam entre 400 e 600 milhões de m³ de RCC. A reconstrução das cidades ocorreu simultaneamente à recuperação das estradas e vias urbanas, o que resultou em técnicas até então inéditas de reciclagem do RCC para aproveitamento na construção civil e na pavimentação (VON STEIN, 2000).

Um dos precursores do uso de resíduos de construção civil é a Alemanha. Diante da determinação do governo alemão em reconstruir a infraestrutura de transportes do país, tornou-se a pioneira na reciclagem de resíduos de construção civil para a pavimentação (LUND, 1993). Levy (2001) *apud* Santos (2007), afirma que, em 1960, na Alemanha, todo o RCC proveniente da guerra havia sido reciclado.

Nas últimas décadas, a geração de grandes volumes de resíduos de construção, chamou a atenção de muitos países. Observou-se um rápido aumento nos custos para disposição destes resíduos nos aterros, o que despertou o interesse do setor público na busca por alternativas para o reaproveitamento e/ou reciclagem do material (VON STEIN, 2000).

2.3.1 Experiência internacional

Nos Estados Unidos e na Europa, a destinação dos resíduos de construção para aterros é prática cada vez menos tolerada. Nas décadas de 70 e 80 alcançou valores médios de cem dólares por tonelada (VON STEIN, 2000).

Por conta da autonomia existente nos estados norte-americanos, cada um possui suas regulamentações e políticas de gerenciamento de resíduos. Até 1998 já haviam sido implantadas cerca de 3.500 unidades recicladoras (EPA, 1998). No país, o custo do agregado reciclado fica, em média, 30% abaixo do custo da brita graduada natural. Conseqüentemente, muitos órgãos e construtoras estão sendo estimulados a substituir o material natural pelo reciclado, sempre que possível (BLANKENAGEL; GUTHRIE, 2006).

Na União Européia, estima-se que sejam gerados 180 milhões de RCC/ano (EC, 2000). Em vários países, novas leis e políticas de taxação de aterros vêm sendo implantadas, visando inibir a deposição em aterros e incentivar a reciclagem. Desde 1996 a política de gerenciamento destes resíduos está em prática em alguns países membros. Em alguns destes

países, antes de qualquer demolição, a questão ambiental é prioridade. Exige-se que sejam apresentados documentos indicando as formas de tratamento dos resíduos às autoridades.

Observa-se que os países que adotaram métodos de gerenciamento para os RCC possuem elevados índices de reciclagem (EC, 2000). Por determinação legal, as obras de reforma e demolição podem produzir no máximo 5% do volume desmontado em RCC. Nestes casos, é obrigatória a venda de componentes usados e a produção de novos materiais com estes resíduos.

Na Dinamarca, existem pesquisas para o uso do agregado reciclado em concretos desde 1970. Porém, somente a partir de 1990, ao criar a taxa para a geração do RCC, o governo despertou o interesse pelo seu reaproveitamento. Em 1992, 25% destes resíduos eram reciclados. Em 2000, o percentual de reciclagem subiu para 60%. À medida que as taxas continuaram subindo, também a reciclagem aumentou. Atualmente, 90% do RCC gerado no país é reciclado (AFFONSO, 2005). O custo para deposição dos resíduos em aterros chega a € 50,00 por tonelada. Em função da elevada taxa, houve um aumento de 900% na reciclagem desde 1987 (SCHNEIDER, 2003).

O mesmo processo verificou-se na Finlândia, com a implantação de um sistema de tributação sobre resíduos em 1998, a produção de concreto reciclado subiu rapidamente (LEVY, 2001).

Além da cobrança de taxas aos aterros, a Inglaterra, a Finlândia e a Holanda também taxam as matérias-primas naturais oriundas de processos de mineração, como por exemplo: a areia, a brita e o cascalho (SCHNEIDER, 2003). É uma forma de incentivar o consumo de agregados reciclados.

Na Suécia, no plano de gerenciamento dos resíduos deve constar a descrição e destinação de cada um dos materiais a serem demolidos (SCHNEIDER, 2003).

O Japão, a Alemanha e a Holanda são países pioneiros na criação de normas para utilização deste tipo de resíduo, através de organizações internacionais de pesquisa.

O Japão dispõe de normas técnicas para uso do RCC desde 1977. Em 1990, a geração de RCC no país, foi de 25,4 milhões de toneladas/ano, das quais 48% foram reutilizadas ou recicladas. Os agregados são classificados inclusive de acordo com a densidade, para uso em concretos e bases de pavimentos. Em função da falta de espaços urbanos, parte destes agregados foi utilizada para aterrar extensas áreas marinhas (QUEBAUD, 1996). Atualmente cerca de 2/3 de todo o volume gerado é reciclado (LEITE, 2001).

Na Alemanha, existem aproximadamente 3.000 usinas de reciclagem de resíduos móveis e 1.600 fixas (MUELLER, 2007 *apud* MIRANDA *et al.*, 2009).

A Holanda, a Bélgica e a Dinamarca são exemplos a serem seguidos. Conseguiram implantar importantes medidas para a melhoria do sistema de tratamento dos seus resíduos e destacam-se por estar entre os países que mais reaproveitam e reciclam RCC no mundo. Nestes países são reciclados cerca de 90% dos RCC.

Em contrapartida, Portugal, Espanha e Itália, possuem reservas naturais em abundância que produzem agregados pétreos de qualidade para a construção civil, a preços relativamente baixos, o que dificulta o consumo dos reciclados (EC, 2000). Portugal, Espanha, Grécia e Irlanda reciclam no máximo 5% do seu resíduo de construção (DORSTHORST; HENDRIKS, 2000).

De modo geral, o percentual de reciclagem de RCC varia bastante entre os países e sofre influência direta de fatores como: disponibilidade de recursos naturais, distância entre os locais de consumo e de produção do agregado natural em comparação com o agregado reciclado, situação econômica e tecnológica e densidade populacional do país (DORSTHORST; HENDRIKS, 2000).

A Tabela 3 a seguir apresenta o percentual de reutilização ou reciclagem dos RCC em países da União Européia.

Tabela 3 - Percentual de reutilização ou reciclagem dos resíduos de construção em países da União Européia (Fonte: EC, 1999).

País	Porcentagem reutilizada ou reciclada (%)
Holanda	90
Bélgica	87
Dinamarca	81
Finlândia	45
Reino Unido	45
Áustria	41
Suécia	21
Alemanha	17
França	15
Itália	9
Espanha	<5
Grécia	<5
Irlanda	<5
Portugal	<5

2.3.2 Experiência nacional

No Brasil, os resíduos de construção estão sendo reciclados há mais de 30 anos. Nas três últimas décadas, vários segmentos da sociedade têm buscado mudanças nos conceitos e processos de produção, especialmente do ponto de vista ambiental, visando estratégias mais sustentáveis. Os esforços concentram-se principalmente na busca por alternativas para redução dos desperdícios através da reutilização e reciclagem, com o uso mais racional dos recursos naturais, pois as jazidas e pedreiras encontram-se cada vez mais escassas e distantes dos grandes centros consumidores.

Em 1991, a Prefeitura Municipal de São Paulo implantou uma usina de reciclagem com a finalidade de produzir agregados para camadas de base, sub-base e reforço de pavimentos, no bairro de Itatinga, zona sul da capital paulistana (CARNEIRO *et al.*, 2001). Porém, somente alguns anos mais tarde, quando o equipamento foi transferido para o bairro de Itaquera, zona leste da cidade, a ideia foi posta em prática (SCHNEIDER, 2003).

Em 1993, a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte/Minas Gerais implantou o Programa de Reciclagem de Entulho, no qual os RCC são transformados em areia e dois tipos de brita, para serem usados em bases de vias públicas e meios-fios, além da fabricação de blocos para obras da própria prefeitura. Dados da Prefeitura de Belo Horizonte, indicam que em 2000, as duas usinas recicladoras municipais reciclavam juntas 350 toneladas/dia, em torno de 25% do RCC coletado. Atualmente com três usinas, a produção diária é de até 1.000 toneladas (SILVA, 2009).

Segundo Miranda *et al.* (2009), até novembro de 2008, existiam pelo menos 47 usinas de reciclagem no país, das quais, 24 públicas (51% do total) e 23 privadas (49% restante). Desse total, apenas 36 encontra-se em operação ou em instalação (Tabela 4).

Tabela 4 – Usinas de reciclagem implantadas no Brasil até novembro de 2008 (Fonte: MIRANDA *et al.*, 2009).

Cidade	Propriedade	Instalação	Capacidade (t/h)	Situação
São Paulo/SP	Prefeitura	1991	100	Desativada
Londrina/PR	Prefeitura	1993	20	Desativada
Belo Horizonte/MG (Estoril)	Prefeitura	1994	30	Operando
Belo Horizonte/MG (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 Bernardo do Campo/SP	Urbem	2005	50	Operando
São Bernardo do Campo/SP	Ecofort	2005	70	Desativada
São José do Rio Preto/SP	Prefeitura	2005	30	Operando
São Carlos/SP	Prefeitura/Prohab	2005	20	Operando
Belo Horizonte/MG (BR 040)	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
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 José 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

Obs.: Segundo Miranda *et al.* (2009), existem usinas em cidades do interior do Rio Grande do Sul que não foram contabilizadas nesta tabela por falta de informações;

(*) A Usina de Reciclagem da Prefeitura Municipal de João Pessoa forneceu os agregados reciclados utilizados nesta pesquisa.

De modo geral, observa-se que usinas implantadas em grandes cidades, ou bem próximas a elas, estão inclinadas a obter maior sucesso, pois estão em locais onde a geração de RCC é elevada, garantindo uma produção constante de agregados reciclados e em quantidade satisfatória (O'MAHONY; MILLIGAN, 1991).

2.4 PROCESSO DE RECICLAGEM

Em qualquer processo de reciclagem é necessário que sejam observadas as vantagens técnicas, econômicas e sócio-ambientais. As vantagens técnicas devem ser aferidas através de ensaios laboratoriais e do uso do material. Dentre as vantagens econômicas, pode-se destacar o reaproveitamento dos resíduos, através da produção do novo material em substituição ao natural, não renovável, contribuindo para a redução do consumo de energia gasta durante o processo de obtenção e produção de matérias-primas naturais, além da redução dos impactos negativos causados pelos resíduos nas cidades como a diminuição nos gastos públicos com limpeza, desobstrução de bueiros e galerias, dragagem de rios e canais, desapropriação de novas áreas para aterros e bota-foras, etc. Por fim, as vantagens ambientais são as mais fáceis de serem sentidas: menor exploração e degradação da natureza causada pelo processo de extração de agregados minerais, além da redução ou eliminação de áreas para bota-foras, contribuindo sobremaneira para a preservação do meio ambiente.

Os equipamentos e o processo de reciclagem nas usinas afetam diretamente as características dos agregados reciclados, tais como: granulometria, forma e resistência dos grãos, teor de impurezas e composição, podendo gerar diferentes materiais.

O processo de produção dos agregados de resíduos de construção, denominados classe A, pela Resolução CONAMA nº 307/2002, é bem simples. As centrais de beneficiamento brasileiras possuem plantas com poucos equipamentos quando comparadas às centrais dos países europeus e norte-americanos, em que a reciclagem destes resíduos é prática consolidada. Os equipamentos mais basicamente utilizados nas usinas recicladoras são: pá carregadeira ou retroescavadeira, alimentador, transportador de correia, britador (de impacto ou de mandíbula), separador magnético ou eletroímã, e peneira vibratória.

A operação de triagem é também chamada de concentração e precede o processo de britagem. Nela o resíduo passa por um processo de seleção, quando são retirados os materiais contaminantes e indesejáveis como: metais, vidros, gesso, madeira, borracha, plástico, papel,

etc. Além destes cuidados, normalmente as correias transportadoras possuem equipamentos magnéticos para separar os metais existentes nos resíduos (ex.: pregos e armaduras). A triagem de alguns componentes do resíduo no próprio local de geração é exigida em países da Europa e no Japão (SCHNEIDER, 2003). Após a triagem, os resíduos seguem para a britagem que pode ser realizadas através de britadores de impacto, de mandíbula ou moinhos de martelo.

O britador de impacto pode ser utilizado na britagem primária e secundária. É um dos equipamentos mais utilizados nas usinas de reciclagem brasileiras (LIMA, 1999). Possui vantagens como: baixa emissão de ruídos e, por sua robustez, processa inclusive peças de concreto armado. O processo de quebra das partículas ocorre por impacto, os grãos se partem nas linhas naturais de ruptura, gerando partículas mais íntegras, com boas características mecânicas. A britagem do material ocorre por colisão em placas fixas de impacto, por isso gera grãos de formato mais cúbico, com granulometria bastante apropriada para o uso em pavimentação. A desvantagem é o alto custo de manutenção, pois os martelos e placas de impacto necessitam de trocas periódicas, além da poeira que normalmente causa.

O britador de mandíbula gera maior quantidade de grãos graúdos, geralmente sendo necessário uma britagem secundária. O processo de fragmentação ocorre por compressão (esmagamento), por isto é indicado para produzir agregados reciclados que apresentam desgaste relativamente alto, não sendo indicados para uso em pavimentação (LUZ *et al.*, 2004). Gera grãos de formato lamelar, mais fracos, com linhas de fratura muito pronunciadas. Ao contrário do britador de impacto, apresenta baixo custo de manutenção e menor emissão de poeira.

Existem ainda os britadores móveis, que podem ser deslocados ao próprio local da obra ou ao depósito de RCC. O equipamento é montado sobre um chassi e se locomove através de esteiras laterais. Possui motor a diesel, gerador elétrico, britador, separador magnético e esteira equipada com um braço que lança o reciclado para a pilha de estoque.

Ao final da etapa de britagem, também conhecida como operação de cominuição, os agregados podem ou não passar por peneiramento, para a separação do material em tamanhos determinados, dependendo da granulometria específica para a finalidade de uso do material. Caso o interesse seja por brita corrida, material sem classificação granulométrica, não é necessário o peneiramento para separação nas diferentes frações granulométricas.

É possível complementar o processo de reciclagem com etapas que melhorem a qualidade dos agregados reciclados. Por exemplo, a lavagem dos agregados em classificador espiral e a formação de pilhas de homogeneização foram testadas por Miranda (2005) na usina de Socorro/SP para areias recicladas, obtendo-se agregados de qualidade superior.

2.5 COMPOSIÇÃO

A composição dos resíduos produzidos no mundo é bastante variável, dependendo do tipo e técnica de construção e da região onde ela está localizada. Os materiais mais abundantes em cada local predominam.

Enquanto nos Estados Unidos e no Japão é bastante comum a presença de madeira, no Brasil e na Europa ela aparece em menor escala (PINTO, 1999).

Tanto em Hong Kong (China) quanto na Bélgica, os RCC são compostos por materiais de origem mineral: argamassa, concreto e restos cerâmicos (PINTO, 1999; EC, 1999).

Na Holanda, os resíduos contêm mais de 90% de alvenaria e concreto, os 10% restantes são compostos de madeiras, metais, embalagens e plásticos (HENDRICKS; JANSSEN, 2001).

No Brasil, o resíduo de construção é composto predominantemente por concreto, argamassa, restos cerâmicos, aço, madeira, plástico e amianto. Porém, nos últimos anos ocorreu um aumento considerável de resíduos de gesso (ANGULO *et al.*, 2002).

Na Europa e nos Estados Unidos o gesso é utilizado em larga escala (PINTO, 1999).

A variabilidade da composição de RCC em algumas cidades brasileira foi observada em pesquisas anteriores e está representada na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Composição de RCC no Brasil (Fonte: SILVA, 2009).

Materiais	Motta (2005)/SP	Affonso (2005)/RJ	Souza <i>et al.</i> (2004)/Recife, PE	Zordan e Paulon (1997)/Ribeirão Preto, SP	Pinto (1999)/São Carlos, SP
Argamassa		40%	27%	37,6%	63%
Concreto	42%	23% a 30%	12%	21,2%	4,4%
Rochas	24%	21%	—	17,9%	—
Cerâmicos	7,7%	6% a 9%	26%	23,4%	29%
Outros	0,3% (telha de amianto)	4% a 8%	13%	—	2,9%
Areia	26% (finos □ 4,76 mm)	—	22%	—	—

2.6 NORMALIZAÇÃO

Para enfrentar o problema da elevada taxa de desperdício na construção civil e conseqüente volume de RCC gerado, são criadas leis e normas que, quando bem integradas às políticas públicas, representam importantes instrumentos para a responsabilização dos próprios agentes públicos e dos geradores dos resíduos, além de contribuírem para a reciclagem e reaproveitamento dos mesmos.

É importante observar e respeitar as normas e especificações técnicas existentes para que o agregado reciclado seja utilizado da forma correta, adotando-se sempre as recomendações e limites estabelecidos, gerando credibilidade no mercado consumidor.

2.6.1 Normalização no Brasil

Embora a primeira usina de reciclagem brasileira tenha sido instalada em 1991, a legislação vigente sobre RCC ainda é pouco expressiva. Nos últimos anos, as obrigações legais vêm, aos poucos, modificando o cenário da indústria da construção civil brasileira. No sentido de amenizar os problemas gerados pelo mau gerenciamento dos RCC, um dos maiores responsáveis por estas mudanças foi o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Em 05 de julho de 2002 o CONAMA publicou a Resolução nº 307/2002, com o objetivo de responsabilizar toda a cadeia produtiva envolvida: municípios, geradores, transportadores e receptores. A partir do momento em que os envolvidos passam a ser responsabilizados e cobrados para a prática das regras contidas nesta Resolução, novos procedimentos são adotados e observam-se mudanças significativas no ciclo de produção. O resultado mais positivo é a redução na geração dos resíduos.

A resolução CONAMA nº 307/2002 define os resíduos de construção civil como “provenientes da construção, demolição, reforma, reparos e da reparação e escavação de solo” e tem como princípio “priorizar a não geração de resíduos e proibir a disposição final em locais inadequados, como aterros sanitários, bota-foras, lotes vagos, corpos d’água, encostas e áreas protegidas por lei”.

De acordo com a mesma Resolução, os resíduos são divididos por classes, em quatro categorias:

- Classe A: são os resíduos passíveis de reciclagem para uso na forma de agregado (alvenaria, argamassa, concreto, telhas cerâmicas e solos). Podem ser reutilizados ou passar por processos de reciclagem para serem transformados em agregados e novas matérias-primas, além de ser possível a disposição em aterros licenciados. Nesta categoria correspondem ao principal alvo das empresas recicladoras e das construtoras;
- Classe B: são os resíduos que podem ser reutilizados no próprio canteiro, encaminhados para a reciclagem ou temporariamente armazenados (madeira, metal, plástico e papel);
- Classe C: são os resíduos de gesso e demais produtos que ainda não possuem tecnologia para reutilização, reciclagem ou recuperação. A destinação deve respeitar a norma técnica específica;
- Classe D: são os resíduos de tintas, solventes, óleos, materiais geralmente voláteis e/ou tóxicos, considerados perigosos. A destinação deve ser conforme norma técnica específica.

A resolução CONAMA nº 307/2002, determina que:

- os municípios e o Distrito Federal elaborem, implementem e coordenem seus Programas Municipais de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, nos quais devem estar contemplados os Planos Integrados de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Nestes Programas Municipais devem constar diretrizes, técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores, de acordo com os critérios técnicos do sistema de limpeza urbana local;
- os grandes geradores elaborem e implementem seus Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil juntamente com os projetos das obras a serem submetidos à aprovação ou ao licenciamento dos órgãos competentes. Nestes Projetos de Gerenciamento devem estar estabelecidos os procedimentos necessários para o adequado manejo e destinação destes resíduos.

No entanto, verifica-se que a maior parte dos municípios e dos geradores de RCC ainda não colocou em prática esta Resolução.

A Tabela 6 indica dados gerais sobre a gestão de RCC em alguns municípios brasileiros.

Tabela 6 – Informações gerais sobre a gestão de RCC em alguns municípios brasileiros (Fonte: Ministério das Cidades/Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2005).

Município	Plano de gestão desenvolvido	Legislação específica aprovada	Pontos de entrega para pequenos volumes	Áreas privadas para manejo de grandes volumes	Áreas públicas para manejos de grandes volumes
Araraquara/SP	sim	-	sim	-	-
Belo Horizonte/MG	sim	-	sim	sim	sim
Brasília/DF	-	-	-	-	sim
Campinas/SP	-	-	-	-	sim
Curitiba/PR	-	sim	-	-	-
Diadema/SP	sim	sim	sim	-	-
Fortaleza/CE	-	-	-	sim	-
Guarulhos/SP	sim	-	sim	sim	sim
Joinville/SC	sim	sim	-	sim	-
Jundiaí/SP	-	-	-	sim	-
Lages/SC	-	sim	-	-	-
Londrina/PR	-	-	-	-	sim
Maceió/AL	-	-	sim	-	-
Piracicaba/SP	sim	-	sim	-	sim
Ponta Grossa/PR	-	-	-	sim	-
Ribeirão Pires/SP	sim	-	sim	-	sim
Ribeirão Preto/SP	-	-	-	-	sim
Rio de Janeiro/RJ	-	sim	sim	-	-
Salvador/BA	sim	-	sim	-	-
Santo André/SP	-	-	sim	-	-
São Bernardo do Campo/SP	-	-	-	sim	-
São Carlos/SP	-	-	sim	-	sim
São Gonçalo/RJ	-	-	-	-	sim
São José do Rio Preto/SP	sim	sim	sim	sim	sim
São José dos Campos/SP	-	-	-	-	sim
São Paulo/SP	sim	sim	sim	sim	-
Socorro/SP	-	-	-	sim	-
Uberlândia/MG	-	-	sim	sim	-
Vinhedo/SP	-	-	-	-	sim

A Tabela 7 indica a destinação adequada dos resíduos, de acordo com a Resolução CONAMA nº 307/2002.

Tabela 7- Destinatário dos resíduos (Fonte: SINDUSCON/SP, 2005).

TIPO DE ÁREA	DESCRIÇÃO	CONDIÇÕES PARA UTILIZAÇÃO	OBSERVAÇÕES
Pontos de entrega	Área pública ou viabilizada pela administração pública apta para o recebimento de pequenos volumes de resíduos da construção civil.	Disponibilizada pela administração pública local como parte integrante do Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil.	Restrição ao recebimento de cargas de resíduos de construção civil constituídas predominantemente por resíduos da construção civil, perigosos e não-inertes (tintas, solventes, óleos, resíduos provenientes de instalações industriais e outros), enquadrados como Classe I da NBR 10004:2004
Área de Transbordo e Triagem (ATT)	Estabelecimento privado ou público destinado ao recebimento de resíduos da construção civil e resíduos volumosos gerados e coletados por agentes privados, e que deverão ser usadas para a triagem dos resíduos recebidos, eventual transformação e posterior remoção para adequada disposição	Licenciada pela administração municipal	Restrição ao recebimento de cargas predominantemente constituídas por resíduos classe D
Área de Reciclagem	Estabelecimento privado ou público destinado à transformação dos resíduos classe A em agregados	Licenciada pela administração pública municipal. No âmbito estadual, licenciamento pelo órgão de controle ambiental, expresso nas licenças de Instalação e Operação	
Aterros de Resíduos da Construção Civil	Estabelecimento privado ou público onde serão empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil classe A no solo, visando à reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro e/ou futura utilização da área, através de princípios da engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente	Licenciamento municipal de acordo com a legislação específica. Licenciamento estadual com possível envolvimento da CETESB, DAIA, DUSM e DEPRN, condicionado ao porte da área, a sua capacidade de recepção de resíduos e localização (condições estabelecidas pela Resolução SMA nº41)	Os resíduos classe B, C e D poderão apenas transitar pela área para serem, em seguida, transferidos para destinação adequada

Aterros para resíduos industriais	Área licenciada para o recebimento de resíduos industriais classe I e II (conforme antiga versão da NBR 10004:2004)	Licenciamento municipal de acordo com legislação específica. Licenças Estaduais: Licença prévia, em caráter precário, concedida pelo DAIA, mediante apresentação de RAP, consulta ao DEPRN e elaboração de EIA-RIMA (quando necessário). Licenças de Instalação e Operação expedidas pela CETESB.	Caracterização prévia dos resíduos definirá se deverão ser destinados a aterros industriais classe I e II (conforme antiga versão da NBR 10004:2004).
Instalações de empresas que comercializam tambores e bombonas para reutilização	Compram e vendem embalagens metálicas ou plásticas destinadas ao acondicionamento de produtos químicos	No município, alvará de funcionamento. No Estado, Licença de Instalação e Operação e Certificação de Aprovação da destinação dos resíduos concedidos pela CETESB.	Esgotamento e captação dos resíduos remanescentes, além da lavagem e captação dos efluentes para destinação conforme certificados de aprovação.
Agentes diversos	Sucateiros, cooperativas, grupos de coleta seletiva e outros agentes que comercializam resíduos recicláveis.	Contrato social ou congêneres, alvará de funcionamento, inscrição municipal.	Em caso de necessidade da utilização de agentes eminentemente informais (condição de baixa atratividade para coleta associada a indisponibilidade de agentes formais), reconhecer o destino a ser dado ao resíduo e registrá-lo da maneira mais segura possível.

Fonte: SindusCon/SP, 2005.

Para viabilizar e orientar os agentes públicos e geradores, quanto ao correto manejo e destinação dos RCC, no ano de 2004 a ABNT criou as primeiras normas brasileiras relacionadas aos RCC:

- NBR 15112:2004 – Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Apresenta as diretrizes para projeto, implantação e operação das áreas de transbordo e triagem: estes locais possibilitam uma melhor logística na destinação, recebimento e triagem/separação dos resíduos, para posterior valorização e aproveitamento através do processamento (caso o local esteja licenciado para este fim);
- NBR 15113:2004 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros - Apresenta as diretrizes para projeto, implantação e operação dos aterros: locais

destinados ao recebimento de resíduos classe A (de acordo com a classificação da Resolução nº 307/2002 do CONAMA), reserva-se o material para aproveitamento futuro ou dispõe de forma adequada ao uso posterior da área;

- NBR 15114:2004 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem - Apresenta as diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem, possibilitando que os resíduos classe A sejam transformados em agregados reciclados, matéria-prima para novas construções.

Alguns estudos indicam que os métodos de controle de qualidade dos agregados naturais nem sempre são aplicados satisfatoriamente aos agregados reciclados de construção, evidenciando a necessidade de normas e especificações técnicas exclusivas para este material. As normas brasileiras que estabelecem especificações técnicas para o uso de agregados reciclados pela indústria da construção civil são:

- NBR 15115:2004 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116:2004 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos (Tabelas 8 e 9).

Tabela 8 – Requisitos gerais para agregados reciclados destinados à pavimentação, conforme a NBR 15116/04.

Propriedades	Agregado reciclado de RCC classe A		Normas de ensaios	
	Graúdo	Miúdo	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
Composição granulométrica	Não uniformidade e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		NBR 7181/84	
Dimensão máxima característica	≤ 63 mm		NBR NM 248/01	
Índice de Forma	≤ 3	-	NBR 7809/83	-
Teor de material < 0,42 mm	Entre 10% e 40%		NBR 7181/84	
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais não minerais de mesmas características – 2 • Materiais não minerais de características distintas – 3 • Sulfatos - 2 		Anexo A - Anexo B (da Norma) NBR 9917/87	

1) Para os efeitos desta norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Tabela 9 – Requisitos específicos para agregados reciclados destinados à pavimentação, conforme a NBR 15116/04.

Aplicação	ISC ⁽²⁾ (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	≤ 1,0	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	≤ 1,0	Intermediária
Material para execução de base de pavimento	≥ 60	≤ 0,5	Intermediária ou modificada

¹⁾ Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão 8,2 tf (80 kN), no período de projeto.

²⁾ ISC = Índice de Suporte Califórnia.

De acordo com a NBR 15116/04, os agregados reciclados são classificados como:

- ARC (agregados de resíduos de concreto): 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;
- ARM (agregados de resíduos mistos): agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda de menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento *Portland* e rochas.

O ARC é considerado de maior qualidade por produzir argamassas e concretos com melhores características mecânicas. Além de apresentar maior densidade aparente.

O ARM é composto por resíduos cerâmicos e de argamassa e geralmente apresenta solo na sua fração fina. Os resíduos de origem cerâmica ou mista podem representar uma importante fração do volume total de RCC. Na maior parte das usinas de reciclagem do país, eles representam mais de 80% do RCC classe A. Quando devidamente reciclados, os resíduos cerâmicos são aplicados em aterros, como materiais de enchimento e como bases e sub-bases de pavimentos. Dependendo de sua composição química, podem ser finamente moídos e utilizados na correção de pH de solos. Em usos mais nobres, pode-se citar a fabricação de vasos ornamentais, tijolos maciços e argamassas não estruturais.

Antes da publicação destas normas pela ABNT, a Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP) publicou em 2003 a PMSP/SP ETS-001 (Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil), que definiu critérios para o uso do agregado reciclado em camadas do pavimento. Nesta

especificação técnica, o índice de suporte Califórnia é considerado o principal parâmetro para o uso dos agregados reciclados na pavimentação. A PMSP/SP ETS-001, quando comparada à NBR 15115:2004 da ABNT, é um pouco mais rígida em relação às propriedades físicas dos agregados reciclados.

Além da criação da especificação técnica para o uso de agregados reciclados em camadas do pavimento, a PMSP criou um decreto no final de 2006, determinando que, a partir de julho de 2007, obrigatoriamente os projetos de obras e serviços de pavimentação devem incluir o emprego de agregados reciclados. No entanto, em função da variabilidade na composição e nas características físicas destes agregados, durante a execução dos serviços podem ser necessárias algumas alterações nos projetos.

2.6.2 Normalização no exterior

As normas ou especificações internacionais para o uso do agregado reciclado em pavimentação, citadas por pesquisas anteriores (NATAATMADJA; TAN, 2001; LEVY, 2001; KUO, 2002; MOTTA, 2005) são:

- Norma Britânica – BS 6543 (1985): *Guide to use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering; Specification for Highway Works (Department of Transport, London, England, 1986)* - indica uma série de aplicações para o uso do concreto britado, inclusive em base e sub-base de pavimentos (POON, 1997);
- Especificação Técnica Holandesa – *Standaard RAW bepalingen (1995): Stichting Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek* – indica os requisitos necessários ao agregado reciclado (tamanho e forma dos grãos, teor de contaminantes, etc.) para que seja utilizado em camadas de sub-base de pavimentos (HENDRICKS; JANSSEN, 2001);
- Especificação Técnica Alemã – TL RC-TOB (1995): *Technischen Lieferbedingungen für Recycling Baustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel* (Especificações técnicas para uso de materiais de construção reciclados em bases de pavimentos, sem ligante)– indica as condições técnicas para aplicação dos RCC para camadas de pavimentos;
- A Áustria apresenta vasta experiência na reciclagem de pavimentos de concreto de cimento *Portland*, pois transforma os antigos pavimentos de concreto em agregados

para utilização na construção dos novos pavimentos rígidos (OECD, 1997 *apud* ALTMAT, 1999). Não são exigidas diferenças entre os métodos de ensaio ou requisitos empregados nos materiais naturais ou reciclados. Porém, a qualidade dos resíduos reciclados é regulamentada pelo *Guidelines for Recycled Building Materials – BRV Richtlinie für Recycling – Baustoffe* (1992). Estas regulamentações foram preparadas pela *Austrian Quality Protection Association for Recycled Building Materials*. Os agregados aplicados em obras de pavimentação devem seguir, de modo geral, os requisitos contidos na *Austrian Standards for Transport and Road Construction (Richtlinien und Vorschriften für den Strassebau – RVS)*.

- Na Itália, as especificações para o uso de agregados reciclados em obras rodoviárias estão contidas na *CNR UNI Standard 10006 - Construzione e manutenzione delle strade – Tecnica di impiego delle terre* (2002). Os requisitos observados são: ocorrência de materiais não pétreos, forma e heterogeneidade dos grãos (COSTA; URSELLA, 2003).
- Especificações Técnicas do estado de Victoria e Nova Gales do Sul / Austrália – *Road Authority of Victoria – Section 820 (2006): Recycled crushed concrete for pavement subbase and light duty base* – para o uso do agregado reciclado de concreto em camadas de sub-bases; *RTA QA Specification 3051: Unbound and Modified Base and Subbase Materials for Surface Road Pavements*; *AUS-SPEC #2 Asset Owners Roadworks Specifications* (Sydney, 1997). Por razões econômicas, são aproveitados grandes volumes de agregados reciclados em obras de pavimentação na Austrália. Porém, não são atendidos todos os requisitos contidos nas especificações (UTS, 1999);
- Especificações Técnicas dos Departamentos de Transporte dos estados norte-americanos (Ex.: da Flórida – FDOT; de Minnesota – Mn/DOT). Nos Estados Unidos, desde 1982, as normas ASTM C 33-82 e C 125-79 criaram condições para o uso de RCC em pavimentos e concretos. Segundo KUO *et al.* (2002), 28 estados norte-americanos permitem o emprego do agregado reciclado de concreto em camadas de base e sub-base de pavimentos, porém, apenas 15 estados possuem especificações técnicas para o uso destes agregados.

Pode-se verificar que diversos países possuem normas e especificações próprias para a produção e emprego dos agregados reciclados em obras rodoviárias, o que tem contribuído para difundir e consolidar o grande potencial de aproveitamento destes agregados. No entanto,

quando se trata do uso do agregado reciclado de concreto em CBUQ, foco da presente pesquisa, a bibliografia é bastante escassa, quase inexistente. Não foram encontradas normas a respeito do uso de agregados reciclados em CBUQ.

2.7 AGREGADOS *VERSUS* PAVIMENTAÇÃO

2.7.1 Classificação dos agregados para uso em pavimentação

Os agregados para construção civil são materiais abundantes no Brasil e no mundo, obtidos de diversos e variados materiais rochosos granulares ou consolidados, fragmentados naturalmente ou através de algum processo industrial, podendo ser originários de rochas sedimentares como arenitos ou siltitos, entre outras; metamórficas como os quartzitos, calcários e gnaisses; ígneas como os basaltos, diabásios, granitos e sienitos.

Para pavimentação, os agregados podem ser classificados quanto à natureza, ao tamanho e à distribuição granulométrica.

- Quanto à natureza como: naturais, artificiais e reciclados.

Os agregados naturais dividem-se em ígneos, sedimentares, metamórficos, areias e pedregulhos. Como o próprio nome diz, são encontrados na natureza, na forma particulada de areia, cascalho, seixo ou pedregulho.

O desconhecimento da denominação petrológica e da classificação da carga elétrica superficial das partículas dos agregados quanto ao teor de sílica presente nas rochas, dificulta a previsão do seu comportamento em misturas asfálticas. Análises petrográficas mais detalhadas sobre a composição química, mineralógica, grau de alteração, tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego, granulação, adesividade ao ligante, etc., podem indicar informações de grande importância para a pavimentação.

Os agregados artificiais são assim definidos porque passam por algum processo de produção industrializado. Podemos citar como exemplos as areias artificiais, escórias de alto-forno e de aciaria, argilas expandidas, argilas calcinadas, entre outros.

Os agregados reciclados são aqueles originados do reuso (reciclagem) de materiais diversos. Podemos citar como exemplos os agregados reciclados dos revestimentos asfálticos e dos resíduos de construção civil. Estes últimos estão sendo abordados de forma detalhada por fazer parte deste trabalho.

- Quanto ao tamanho, no caso específico para uso em pavimentação, de acordo com a norma DNIT 031/2004 – ES, o agregado divide-se em: agregado graúdo (compreende as britas, pedriscos, cascalhos e seixos), é aquele com dimensões maiores que 2 mm, que fica retido na peneira de nº 10; agregado miúdo (compreende as areias e o pó de pedra), tem dimensões maiores que 0,075 mm e menores que 2 mm, fica retido na peneira de nº 200 e passa na de nº 10; por fim, o material de enchimento, também chamado *filer*, que compreende os cimentos *Portland*, cal calcinada, etc., possui no mínimo 65% dos grãos menores que 0,075 mm, passando na peneira de nº 200.

O tamanho dos agregados interfere no comportamento das misturas asfálticas. Caso o tamanho máximo do agregado seja excessivamente pequeno, a mistura tenderá a apresentar-se de forma instável. Do contrário, quando o tamanho máximo do agregado é excessivamente grande, tende a dificultar a trabalhabilidade da mistura podendo provocar também sua segregação.

- Quanto à distribuição dos grãos, as principais graduações são: densa ou bem graduada, quando o agregado possui distribuição granulométrica de forma contínua, próxima à de densidade máxima; aberta, quando o agregado possui distribuição granulométrica contínua, mas com quantidade insuficiente de materiais finos para preenchimento dos vazios, apresentando a curva abatida e próxima de zero nas frações menores que 0,075 mm; uniforme, quando o agregado apresenta curva granulométrica bastante íngreme, indicando que a distribuição de suas partículas ocorre em uma faixa bem estreita; e descontínua ou com degrau, quando a curva apresenta-se com um patamar correspondendo às frações intermediárias, indicativa de pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, por isso estes agregados, quando usados em misturas asfálticas, a tornam susceptíveis à segregação e devem ser trabalhados adequadamente (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A avaliação da distribuição granulométrica dos agregados é uma caracterização física imprescindível para seu uso em misturas asfálticas, por interferir nas principais propriedades destas misturas: durabilidade, estabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, rigidez, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência ao dano por umidade induzida, etc. A subdivisão da graduação em classes auxilia na diferenciação dos tipos de misturas asfálticas.

2.7.2 Consumo de agregados em pavimentação

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro (DNPM, 2007), os agregados são os materiais de construção mais utilizados no mundo.

O maior mercado consumidor de rocha britada beneficiada é a construção civil, que em 2007 demandou 66% do total, seguida pela construção/manutenção de estradas com 15%, a pavimentação asfáltica com 4% e os artefatos de cimento com 3,5%. Em relação à rocha britada bruta, o setor de construção civil absorveu 48%, em seguida o setor de construção/manutenção de estradas com 23% e a pavimentação asfáltica com 7% (DNPM, 2007).

É visível um crescimento no consumo brasileiro, fortemente impulsionado em função das obras do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), iniciadas em 2007. Estão previstos importantes investimentos para os setores de infraestrutura como: construção, adequação, duplicação e manutenção de 45.000 km rodovias, 2.518 km de ferrovias, ampliação de 20 aeroportos e 12 portos, barragens, dentre outras obras (DNPM, 2007).

Um levantamento da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas da Universidade de São Paulo (FIPE), para o projeto “Diretrizes para a Mineração de Areia na Região Metropolitana de São Paulo”, constatou que a construção de uma unidade básica de 35 m² consome 21 toneladas de agregados; em habitações populares, uma unidade básica de 50 m², consome 68 t; um edifício público de 1.000 m², 1.360 t; uma escola padrão de 1.120 m², 1.675 t. Em pavimentação urbana, um quilômetro de via pública com 10 metros de largura, consome entre 2.000 t e 3.250 t; um quilômetro de estrada vicinal, 2.800 t; em uma estrada pavimentada normal, o consumo é bastante elevado, cerca de 9.500 t/km.

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro do DNPM (2007), as reservas de areia e brita no Brasil são estimadas em 2,7 bilhões e 12 bilhões de toneladas, respectivamente, considerando-se a densidade da areia equivalente a 1,64 t/m³ e a da brita equivalente a 1,80 t/m³.

Em 2003, a produção brasileira alcançou 320,4 milhões de toneladas, das quais 96 milhões de toneladas, que equivalem a 30% do mercado brasileiro foram consumidas em pavimentação (DNPM, 2004).

Na Europa, estima-se que o setor de pavimentação consome aproximadamente 1 bilhão de toneladas de agregado natural por ano (HILL *et al.*, 2001).

Segundo Levy (2001), “os agregados minerais – areia e pedra britada – constituem hoje o segmento do setor mineral mais explorado no país”. Porém, a possibilidade de exploração dos agregados na natureza vem diminuindo gradativamente principalmente em virtude de um planejamento urbano e territorial inadequado, zoneamentos restritivos, usos competitivos do solo, problemas de sustentabilidade ambiental, etc.; gerando incertezas quanto às perspectivas de garantia de abastecimento futuro.

O resíduo de construção pode vir a ser uma alternativa técnica interessante, principalmente em regiões com problemas para obtenção de agregados pétreos naturais. Levando-se em conta que a mineração de agregados para a construção civil gera grandes volumes, apresenta beneficiamento simples e baixo preço unitário, e que o transporte responde por cerca de 1/3 do custo final da areia e 2/3 do preço final da brita. Para compensar, do ponto de vista econômico, devido à alta participação do transporte no custo final, o agregado deve ser produzido no entorno do local de consumo (DNPM, 2007).

A Tabela 10 mostra as principais utilizações dos agregados na construção civil.

Tabela 10 - Principais utilizações dos agregados na construção civil.

Areia artificial e areia natural	Assentamento de bloquetes, tubulações em geral, tanques, podendo entrar na composição de argamassas, concreto e asfalto .
Pedrisco	Confecção de pavimentação asfáltica , lajotas, bloquetes, intertravados, lajes, jateamento de túneis e acabamentos em geral.
Brita 1	Intensivamente na fabricação de concreto, com inúmeras aplicações como na construção de pontes, edificações e grandes lajes.
Brita 2	Fabricação de concreto que exija maior resistência, principalmente em formas pesadas.
Brita 3	Também denominada pedra de lastro utilizada nas ferrovias.
Brita 4	Produto destinado a obras de drenagem como drenos sépticos e fossas.
Rachão, pedra de mão ou pedra marroada	Fabricação de gabiões, muros de contenção e bases.
Brita graduada	Em bases e sub-bases, pisos, pátios, galpões e estradas.

Fonte: KULAIF, Yara (2001).

2.7.3 Uso de agregados reciclados em pavimentação

O elevado consumo de agregados em pavimentação é um dos motivos para que se invista em possíveis métodos para aplicação dos agregados reciclados. Vários produtos estão sendo estudados para uso em substituição aos agregados minerais naturais, destacando-se: os agregados reciclados de construção, as argilas expandidas⁴, os rejeitos de produtos siderúrgicos⁵, os resíduos de pneus triturados (para a utilização como agregados no concreto e em misturas betuminosas para pavimentação), entre outros. A possibilidade de uso de diferentes resíduos tem motivado o desenvolvimento de tecnologias capazes de reciclar e reutilizar os materiais em obras de pavimentação.

A produção de agregados reciclados de resíduos de construção para uso em bases e sub-bases de pavimentos ou para regularização de camadas primárias é uma das aplicações mais antigas deste material. No entanto, foi principalmente nos últimos 30 anos, que inúmeras pesquisas foram desenvolvidas (BODI *et al.*, 1995; TRICHÊS; KRYCKYJ, 1999; VON STEIN, 2000; CARNEIRO *et al.*, 2001; CHINI *et al.*, 2001; SOBHAN; MASHNAD, 2003; MOTTA, 2005; BLANKENAGEN; GUTHRIE, 2006; LEITE, 2007), demonstrando que, apesar da grande variabilidade, o uso dos agregados reciclados nestas camadas do pavimento é promissor. As experiências são satisfatórias e a prática é bastante difundida e consolidada em diversos países.

Por ser avaliado como um excelente material para a engenharia, em função de importantes qualidades para obras de pavimentação como: potencial de auto-cimentação (decorrente da presença de materiais pozolânicos), boa resistência mecânica e baixa expansibilidade, a maior parte do agregado reciclado de construção civil produzido no Brasil e no exterior é utilizada quase que exclusivamente em base, sub-base e reforço de pavimentos.

Por outro lado, este é um aproveitamento limitado, principalmente no caso do agregado reciclado de concreto, originado de um dos materiais mais nobres e mais empregados da construção civil. Mesmo em países da União Européia, com elevados índices de reciclagem, em média, menos de 20% do agregado natural é substituído pelo agregado reciclado. A maior

⁴ As argilas expandidas são resultantes do cozimento do lodo oriundo do tratamento de esgotos, ou de material argiloso especialmente preparado para esse fim.

⁵ Escórias de aciaria ou de alto-forno.

parte do agregado reciclado produzido termina sendo aproveitado apenas em camadas de aterro e regularização (MUELLER, 2007 *apud* MIRANDA *et al.*, 2009).

O ALT-MAT⁶ (1999) considera que até 90% de todo o RCC produzido pode ser aproveitado em forma de agregado, por tratar-se de material resistente. Os resultados de ensaios nos agregados reciclados indicam que a abrasão *Los Angeles* do material reciclado é superior à da brita natural, porém, os resultados de desempenho mecânico em campo indicam que possuem comportamento muito melhor que o esperado pelos ensaios laboratoriais. Os ensaios de lixiviação realizados na Dinamarca, Suécia, Reino Unido e França demonstraram que os materiais alternativos não parecem ter qualquer efeito significativo sobre a qualidade das águas subterrâneas. Os agregados reciclados pesquisados em vários países apresentaram melhor desempenho *in situ* do que seria esperado a partir dos resultados de ensaios laboratoriais.

Das usinas de reciclagem em funcionamento no Brasil, a maioria produz agregados básicos para aplicação em camadas de pavimentos (LEITE, 2007). De acordo com Silva (2007), a capacidade nominal de produção destas usinas varia entre 3 e 60 t/h, estando grande parte na faixa de produção real entre 100 e 300 m³/dia.

No caso específico de emprego do agregado reciclado para obras de pavimentação, as pesquisas anteriores (BODI *et al.*, 1995; TRICHÊS; KRYCKYJ, 1999; VON STEIN, 2000; CARNEIRO *et al.*, 2001; CHINI *et al.*, 2001; SOBHAN; MASHNAD, 2003; MOTTA, 2005; BLANKENAGEN; GUTHRIE, 2006; LEITE, 2007) indicam vários benefícios:

- diminuição nos gastos com a limpeza urbana e conseqüente economia nos custos de operação dos aterros sanitários, dragagens de rios, limpezas de bueiros e galerias, saneamento em geral;
- menor necessidade de áreas para aterros sanitários e bota-foras, por conta do aumento da vida útil dos já existentes;
- maior facilidade para implantação dos programas municipais de gerenciamento de resíduos sólidos;

⁶ ALT-MAT significa *Alternative Materials in Road Construction*. O ALT-MAT é formado por um grupo de países da União Européia que esteve reunido tendo como principal objetivo desenvolver métodos para avaliar a adequação de materiais alternativos para uso na construção de estradas.

- melhoria do meio ambiente, através da diminuição da poluição sonora, visual e do ar causada pela exploração das jazidas naturais e pelo acúmulo de resíduos de obras;
- economia nos custos das obras de pavimentação, visto que os agregados reciclados apresentam valor inferior quando comparados aos agregados naturais;
- elevado consumo de material reciclado, tanto na fração graúda quanto miúda;
- a utilização de parte da fração graúda diminui o consumo de energia necessária durante o processo de reciclagem do RCC;
- simplicidade no processo de produção dos agregados e de execução das camadas de pavimento com estes agregados, contribuindo para a redução dos custos.

2.7.3.1 Experiência nacional

No Brasil, a brita corrida reciclada é comumente utilizada em pavimentação desde a instalação da primeira usina no país, em São Paulo, no ano de 1991. A partir daí, muitas outras usinas foram instaladas e seus projetos sempre visaram esta aplicação, por apresentar um elevado consumo destes agregados e ser relativamente fácil o cumprimento dos parâmetros técnicos necessários.

Bem antes da instalação da primeira usina de reciclagem em São Paulo, no ano de 1984, foi executada uma via na zona oeste da cidade (Rua Gervásio da Costa), onde a camada de reforço do subleito utilizou RCC. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) acompanhou a execução da obra e o desempenho do pavimento, que obteve resultados satisfatórios (BODI *et al.*, 1995).

Atualmente, várias cidades possuem obras de pavimentação executadas com brita corrida reciclada nas camadas de base e sub-base, como exemplo São Paulo, Curitiba, Mauá, São Bernardo do Campo, Vinhedo, João Pessoa e Belo Horizonte.

A área de circulação do Campus Zona Leste da USP foi totalmente pavimentada com agregado reciclado e asfalto-borracha, exigência contida no edital de licitação da obra. O agregado reciclado utilizado foi controlado tecnologicamente com base nos requisitos contidos na NBR 15116/04. Os resultados financeiros desta obra foram satisfatórios, apresentaram uma economia de aproximadamente 40%.

Existem também obras privadas que utilizaram agregados reciclados na pavimentação, como por exemplo: o supermercado Carrefour e o pátio da fábrica da Yoki, ambas na região de São Bernardo do Campo/São Paulo.

Em Belo Horizonte/Minas Gerais, os agregados reciclados produzidos pelas três usinas de reciclagem da prefeitura são amplamente aproveitados nas vias urbanas, em camadas de base e sub-base de pavimentos, apresentando desempenho satisfatório e semelhante aos trechos executados apenas com agregado natural (FERNANDES, 2004). Desde 1996 até julho de 2001, aproximadamente 400 km de ruas foram implantadas e reconstruídas, resultando no aproveitamento de 136.840 toneladas de resíduos de construção (DIAS, 2004).

Em Florianópolis/Santa Catarina, Trichês; Kryckyj (1999) estudaram quatro tipos de materiais diferentes para analisar as características físicas e verificar a capacidade de suporte:

- resíduo branco, formado principalmente por restos de argamassas e concreto;
- resíduo vermelho, formado por resíduos cerâmicos, telhas, tijolos;
- solo areno-siltoso;
- solo argiloso.

Após avaliarem os resíduos, os solos e as misturas de solo com diferentes percentuais de resíduo, concluíram que: os RCC não apresentaram expansão, além de colaborarem para a diminuição da expansão nas misturas com solo; as misturas solo-resíduo apresentaram índice de suporte Califórnia mais elevado que os resíduos; acrescentando-se resíduos à parcela fina dos solos, percebeu-se uma melhora na compactação e conseqüente aumento da capacidade de suporte.

Em 2000, a Secretaria de Serviços Urbanos de Uberlândia e a Universidade Federal de Uberlândia uniram-se em um estudo onde a meta era a definição de parâmetros para a aplicação dos RCC em camadas do pavimento. Para isto, em 2003 foi executada uma pista experimental com o uso do agregado reciclado na camada de base, num local bastante solicitado, pois serve de acesso a um aterro sanitário. Passados três anos de uso, visualmente não foi percebido nenhum tipo de defeito no pavimento (MOREIRA *et al.*, 2006).

Em 2001, na Bahia, Carneiro *et al.*, realizaram ensaios de caracterização física e mecânica (análise granulométrica, abrasão *Los Angeles*, compactação e índice de suporte Califórnia) nos agregados reciclados, a fim de verificar a viabilidade técnica para o emprego do material em camadas de base e sub-base de pavimentos. Os resultados com as frações graúda e miúda

dos agregados e com diferentes proporções de agregados misturados ao solo foram satisfatórios, confirmando a viabilidade de uso do material.

Em 2002, em Goiânia, Ribeiro *et al.*, analisaram o comportamento de agregados reciclados brancos, vermelhos e misturas dos agregados reciclados com o solo, para aproveitamento em pavimentação. Após a realização dos ensaios de compactação e índice de suporte Califórnia, eles concluíram a viabilidade técnica do uso do material.

Também em Goiânia, entre 2003 e 2004, numa pesquisa desenvolvida por FURNAS em parceria com a Prefeitura Municipal de Goiânia, foi executada uma pista experimental, num local de intensa movimentação de caminhões, por ser acesso à central de abastecimento da cidade. Foram utilizadas misturas de solo argiloso com agregado reciclado na proporção de 75% de agregado reciclado para a camada de base e 83% de agregado reciclado para a camada de sub-base. Após analisarem os resultados dos ensaios realizados na pista experimental, Mendes *et al.* (2004), concluíram que o agregado reciclado é satisfatório para ser aplicado em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, demonstrando a viabilidade técnica.

Fernandes (2004) estudou as propriedades mecânicas de agregados reciclados de concreto e de agregados reciclados mistos, coletados no Rio de Janeiro e em Belo Horizonte, para emprego em base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos. Após analisar os resultados dos ensaios de módulo de resiliência, Fernandes verificou que a granulometria e a energia de compactação pouco interferem no módulo de resiliência, que sofre mais influência da composição do agregado reciclado. Os agregados reciclados mistos possuem valor de módulo de resiliência menor que os agregados reciclados de concreto e estes, possuem o módulo menor que o encontrado para a brita graduada natural. Os ensaios triaxiais com cargas repetidas que indicam a deformação permanente dos agregados, demonstraram que a granulometria e a energia de compactação interferem na deformação permanente do material. Quando comparado à brita graduada natural, para o mesmo nível de tensões, o agregado reciclado foi mais resistente, apresentando menor deformação permanente.

Em 2005, após conduzir ensaios de índice de suporte Califórnia, módulo de resiliência, resistência à tração e resistência à compressão simples, Motta concluiu que o agregado reciclado misto de RCC é uma boa alternativa para a execução de bases e sub-bases na

pavimentação de vias nos grandes centros urbanos ou cidades de médio porte, caracterizadas pelo baixo volume de tráfego⁷. O agregado reciclado misto aos 90 dias e 180 dias de cura, apresentou valores de índice de suporte Califórnia de 116% e 124%, respectivamente, superiores quando comparados à brita graduada simples, com ISC igual a 96%. O módulo de resiliência aos 90 dias de cura do agregado reciclado misto, entre 190 MPa e 400 MPa, foi semelhante ao da brita graduada simples, entre 200 MPa e 370 MPa.

Em São Paulo, Leite (2007) pesquisou o comportamento mecânico dos agregados reciclados mistos para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. A pesquisadora chegou à conclusão que, apesar da variabilidade do material, controlando-se a execução do pavimento e empregando-se energia de compactação modificada, o mesmo apresentará um bom desempenho. Segundo Leite, para que isto ocorra, é de fundamental importância o controle das propriedades físicas do agregado reciclado após a compactação, pois as quebras devem existir no decorrer da execução do pavimento e não durante a vida útil do mesmo.

Silva *et al.* (2008) estudaram RCC da região metropolitana de Fortaleza/Ceará, para fins de pavimentação. As misturas de solo continham 50% de RDC graúdo, 40% de RCC miúdo e 10% de solo da cidade de Fortaleza. Foram executados ensaios de caracterização dos materiais, índice de suporte Califórnia (ISC) e módulo de resiliência (MR). Foram empregadas três diferentes energias de compactação para verificar a influência da compactação no desempenho das propriedades mecânicas das misturas. Os resultados demonstraram a eficiência da estabilização da mistura de solo com RCC, comprovando a possível empregabilidade do material até mesmo para pavimentos com alto volume de tráfego.

2.7.3.2 Experiência internacional

Na Holanda, país que mais recicla RCC no mundo, cerca de 90% dos agregados reciclados produzidos é destinado à pavimentação. Desde a década de 70, os resíduos de alvenaria e de

⁷ Entende-se como via de baixo volume de tráfego aquela com previsão de tráfego de até 106 repetições de carga equivalente ao eixo padrão de 82 kN, durante o período de projeto (BERNUCCI, 1995).

concreto são aproveitados como material para as camadas de base e sub-base de pavimentos (LEITE, 2007).

Molenaar; Van Niekerk (2002) realizaram ensaios laboratoriais para verificar os efeitos da granulometria, composição e grau de compactação dos agregados reciclados nas propriedades mecânicas das camadas dos pavimentos. Concluíram que, apesar da graduação e da composição dos agregados reciclados serem fatores importantes, o mais influente deles é o grau de compactação. Este resultado é animador visto que, parâmetros como composição e granulometria são mais difíceis de serem controlados. O grau de compactação pode ser facilmente fiscalizado e conferido a um baixo custo.

No Reino Unido, no início da década de 90, pesquisas analisaram resíduos de alvenaria e resíduos de concreto, para verificarem a viabilidade de aproveitamento dos mesmos em camadas de sub-base de pavimentos. Os resultados dos ensaios de índice de suporte Califórnia foram comparados aos da brita calcária. O agregado de concreto apresentou o mesmo comportamento do material calcário, com valores de ISC semelhantes. A brita cerâmica, em função da grande variabilidade de seus componentes, apresentou uma menor capacidade de suporte, porém, ainda assim, o seu índice de suporte Califórnia foi superior a 30% do limite mínimo estipulado pelo Reino Unido para que os materiais sejam empregados em camadas de sub-base (O'MAHONY; MILLIGAN, 1991).

Na Austrália, Nataatmadja; Tan (2001) estudaram o comportamento resiliente de agregados reciclados de concreto obtidos de quatro amostras de concreto que foram divididas pelas diferentes resistências à compressão: 75 MPa, 49 MPa, 18,5 MPa e 15 MPa. Chegaram à conclusão que a resistência à compressão do concreto de origem interfere nos resultados de módulo de resiliência e na deformação permanente do agregado reciclado de concreto, porém para estes pesquisadores, o fator mais influente é a granulometria, pois eles verificaram que os materiais bem graduados resultam em módulos de resiliência mais elevados.

Nos Estados Unidos, em New Jersey, no final da década de 90, após um vasto estudo laboratorial com agregado reciclado de concreto, brita graduada e brita graduada acrescida de diferentes percentuais de agregado reciclado de concreto, os ensaios triaxiais de carga repetida, os resultados de módulo de resiliência e de deformação permanente indicaram que: tanto o agregado reciclado de concreto quanto a mistura de agregado reciclado de concreto com brita graduada simples possuem módulos de resiliência maiores que o da brita graduada simples. No entanto, o agregado reciclado de concreto apresentou maior deformação

permanente quando comparado à brita graduada simples, nas mesmas condições (BENNERT *et al.*, 2000).

No *Florida Department of Transportation* (FDOT – Departamento de Transportes do estado norte-americano da Flórida), entre 1996 e 1997, foram desenvolvidas pesquisas para a criação de metodologias e especificações para o aproveitamento de agregados reciclados de concreto provenientes dos antigos pavimentos de concreto, na composição do concreto de pavimentos rígidos e nas camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis (KUO *et al.*, 2001). A proposta do FDOT é reciclar o concreto retirado do pavimento a ser recuperado e aplicar o agregado reciclado de concreto para restaurá-lo ou reconstruí-lo. Reutilizar o concreto retirado no mesmo local. Desta forma, tem-se a otimização do processo de reciclagem e a diminuição nos gastos com o transporte e a deposição dos materiais (CHINI *et al.*, 2001).

Segundo o *Federal Highway Administration* (FHWA, 1997), por possuir drenabilidade, durabilidade e boa capacidade de suporte, o agregado reciclado de concreto é utilizado por, pelo menos, vinte estados norte-americanos, onde é considerado um excelente material para emprego em camadas de base e sub-bases de pavimentos.

Num estudo desenvolvido pela *University of Central Florida*, em 2000, foram construídas nove seções-tipo diferentes, com o uso de agregado reciclado de concreto (ou na camada de base, ou no concreto de cimento *Portland*). Sendo quatro pavimentos com concreto asfáltico e cinco com concreto de cimento *Portland*, dentre os quais, foram executados dois pavimentos de controle: um com concreto asfáltico e base executada com 100% brita calcária e outro com o concreto de cimento *Portland* e base executados com 100% brita natural. Os resultados obtidos demonstraram que:

- nos pavimentos flexíveis, com revestimento de concreto asfáltico e base com 100% de agregado reciclado de concreto, não houve o aparecimento de qualquer tipo de trinca, fissuras por fadiga, nem ruptura e ainda apresentaram desempenho superior ao da seção-tipo de controle, executada com material 100% natural (KUO *et al.*, 2002; CHINI *et al.*, 2001);
- nos pavimentos de concreto, onde foram empregados 25% de agregado reciclado no concreto com base 100% natural, 75% de agregado reciclado no concreto com base 100% natural, 100% de agregado reciclado no concreto com base 100% natural e 100% agregado natural no concreto com base 100% agregado reciclado, na seção-tipo com 100% agregado reciclado no concreto, a resistência à compressão simples, aos 28

dias, apresentou um resultado 20% menor que a seção-tipo de controle, com 100% de agregado natural no concreto. Porém, nas seções-tipo com 25% de agregado reciclado no concreto e base 100% natural e com 100% agregado natural no concreto e base 100% agregado reciclado, o desempenho foi totalmente satisfatório, não apresentando qualquer tipo de defeito ou irregularidade na superfície (CHINI *et al.*, 2001).

A Tabela 11 a seguir indica resumidamente as características observadas nos agregados reciclados de concreto, pesquisados para uso em pavimentação, em diferentes lugares no Brasil e no mundo.

Tabela 11 – Comparativo entre os resultados de diferentes pesquisas com agregados reciclados de concreto.

Procedência do agregado reciclado de concreto	Absorção	Densidade real	Abrasão Los Angeles (%)	Índice de forma	Autor
Coruña/Espanha	6,10%	2,630 g/cm ³	34,00	—	Pérez <i>et al.</i> (2010)
Belo Horizonte/MG	8,0 a 10,0%	2,570 g/cm ³	47,00	0,88	Silva (2009)
Fortaleza/CE	2,60%	2,600 g/cm ³	40,78	0,73	Ron <i>et al.</i> (2008)
Santo André/SP	11,50%	2,750 g/cm ³	—	—	Leite (2007)
Melbourne/Australia	5,9%	2,471 g/cm ³	—	—	Paranavithana <i>et al.</i> (2006)
Manaus/AM	11,00%	2,350 g/cm ³	40,00	—	Frota <i>et al.</i> (2006)
Goiânia/GO		2,680g/cm ³	33,00	0,9	Guimarães <i>et al.</i> (2005)
Manaus/AM	9,0%	2,337 g/cm ³	44,00	—	Frota <i>et al.</i> (2004)
Flórida/USA	4,4% ^(*)	—	—	—	Chini <i>et al.</i> (2001)
Taejon/Coréia do Sul	6,2%	—	—	—	Lim <i>et al.</i> (2001)

^(*) Natureza cimentícia composta apenas por concreto, sem argamassa.

É consenso entre as pesquisas que os agregados reciclados de RCC para uso em pavimentação urbana e rural, em camadas de base, sub-base e reforço de subleito, são favoráveis do ponto de vista técnico, econômico e sócio-ambiental. Apesar de a durabilidade do agregado reciclado ao longo da vida útil do pavimento ainda ser questionada. Alguns estudos indicam que, em função da variabilidade na composição, alta porosidade, altas percentagens de absorção de água, características físicas e particularidades, os métodos de controle de qualidade usualmente empregados nos agregados naturais destinados à pavimentação não funcionam em agregados reciclados de construção civil (ZORDAN, 2003). Daí a importância de se respeitar as normas e especificações já existentes para este material, cumprindo as determinações e limites estabelecidos (BLANKENAGEL; GUTHRIE, 2006; BENNERT *et al.*, 2000).

3. CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE

Neste capítulo será realizada uma rápida revisão bibliográfica sobre o tipo de mistura asfáltica a quente mais utilizado no Brasil, que é o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), ou simplesmente, concreto asfáltico (CA), por ser tema deste estudo. Também será abordado o método de dosagem Marshall.

3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é o tipo de mistura asfáltica mais utilizada em locais de tráfego pesado. Sendo composto, segundo a Especificação de Serviço DNIT 031/2006-ES, por:

- agregado graúdo – material retido na peneira nº4 (abertura de 4,8 mm);
- agregado miúdo – material passante na peneira nº4 e retido na peneira nº200 (abertura de 0,074 mm);
- fíler mineral, também chamado de material de enchimento – que passa na peneira nº200;
- cimento asfáltico de petróleo (CAP) – ligante utilizado para aglutinação dos agregados entre si, proporcionando coesão e impermeabilidade à mistura, além de contribuir para o conforto ao rolamento e segurança viária ao tráfego.

No Brasil, o projeto de dosagem das misturas asfálticas a quente para pavimentação é realizado de acordo com as especificações de serviço do DNIT (031/2006 – ES), devendo ser executado com rigorosa seleção e controle dos materiais e processos, desde a coleta, armazenagem, produção da mistura, ensaios de caracterização e aplicação no pavimento. Por este motivo, o concreto asfáltico é considerado o tipo de revestimento asfáltico mais nobre.

Possui graduação densa, caracterizada por uma curva granulométrica bem-graduada e contínua, onde os agregados de maiores dimensões são envolvidos e preenchidos pelo ligante e pelos agregados menores, proporcionando misturas com poucos vazios no esqueleto mineral (geralmente em torno de 4%) e muito resistentes, porém bastante sensíveis às variações na quantidade de ligante.

O excesso de ligante pode causar exsudação caracterizada pela deformação permanente por fluência (deformação plástica), decorrente da ação do tráfego, com fechamento da macrotextura superficial. Por outro lado, a escassez deixará a mistura mais propensa a trincas, com baixa resistência à tração, acentuado desgaste superficial e pequena durabilidade em serviço (reduzida vida de fadiga). Segundo Vasconcelos (2004), um revestimento pode desagregar, ou trincar, caso haja deficiência de menos de 0,5% de ligante asfáltico em relação ao valor de projeto, tido como “ótimo”. Assim como pode apresentar exsudação e deformação permanente caso haja 0,5% de excesso.

Bernucci *et al.* (2007) consideram que uma das formas de reduzir a sensibilidade das misturas betuminosas a pequenas variações do teor de ligante, mesmo dentro do admissível em usinas de asfalto, e torná-las ainda mais resistentes e duráveis em vias de tráfego pesado, é substituir o ligante asfáltico convencional por asfalto-borracha ou por ligante modificado por polímero.

Hislop; Coree (2000) acreditam que a granulometria e a textura superficial dos agregados são melhores indicadores de valores críticos para o parâmetro VAM (vazios do agregado mineral). Segundo estes pesquisadores, especificar um valor mínimo de VAM baseando-se apenas no TMN (tamanho máximo nominal) pode ser irrealista.

O comportamento das misturas betuminosas tem sido tema de estudos em diversos países do mundo nas duas últimas décadas (MONISMITH *et al.*, 1989; GOETZ, 1989; YONDELL; SMITH, 1989; RUTH *et al.*, 1989; HUNTER, 1994; AI, 1994; EPPS *et al.*, 2000, entre outros). Os procedimentos de ensaio e de dosagem das misturas asfálticas vêm sofrendo algumas modificações que mostram uma forte tendência para deixar de lado os métodos antigos e projetá-las de acordo com as solicitações e especificações de cada projeto (tráfego, estrutura, condições climáticas, entre outras).

Entre 1987 e 1993, o governo americano investiu US\$ 150 milhões em uma pesquisa denominada SHRP (*Strategic Highway Research Program*), desenvolvida pelo FHWA (*Federal Highway Administration*), com a finalidade de testar e desenvolver novos métodos para especificação de ligantes asfálticos e dosagem das misturas, a fim de melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas. A metodologia desenvolvida pela pesquisa foi denominada *Superpave* (*Superior Performing Asphalt Pavements*).

Antes do surgimento do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) e desenvolvimento do *Superpave*, nos Estados Unidos, os métodos Marshall (desenvolvido pelo engenheiro Bruce Marshall e aprimorado durante a 2ª Guerra Mundial) e Hveem eram bastante adotados entre a

década de 1940 até meados dos anos 1990. Dos departamentos de transporte americanos, 75% utilizavam o método Marshall, ficando os outros 25% com o método Hveem.

Atualmente, alguns estudiosos acreditam que o método de dosagem *Superpave* produz misturas mais semelhantes às condições de serviço, quando comparadas às misturas obtidas pela dosagem Marshall. Com isto, pouco a pouco o método de dosagem Marshall vem sendo substituído pelo método *Superpave*. Porém, aqui no Brasil, a metodologia Marshall continua sendo a mais difundida e utilizada. Por este motivo, foi a escolhida para realização da presente pesquisa. A metodologia *Superpave* é utilizada no Brasil apenas em forma de teste, por alguns pesquisadores.

As principais diferenças entre os dois processos de dosagem, Marshall e *Superpave*, são:

- o procedimento de compactação dos corpos de prova (Figura 3) – no método *Superpave*, a compactação ocorre por amassamento, em giros; no método Marshall, por impactos;



Figura 3 – (a) Compactador giratório *Superpave* e (b) Compactador Marshall (automático).

- quanto ao ensaio para avaliar o envelhecimento de curto prazo das misturas, é presente apenas no método *Superpave* (VASCONCELOS, 2005);
- a forma de determinação da densidade máxima teórica (DMT), para garantir a melhor estabilidade. Na metodologia Marshall, a DMT é calculada através da ponderação das densidades reais dos materiais constituintes da mistura, através do método de *Fuller-*

Talbot. Na metodologia *Superpave*, é comum a obtenção da densidade máxima teórica (DMT) através da aplicação de uma bomba de vácuo (ASTM D 2041).

Os estudos têm demonstrado que o MR (módulo de resiliência) dos materiais viscoelásticos varia em função do tempo de aplicação da carga e do tempo de repouso, pois o deslocamento recuperável decorre de ambos. O MR de misturas asfálticas a quente sofre variações também com o tipo de mistura, a faixa granulométrica, o tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas, a energia de compactação, a temperatura de compactação, a temperatura de realização do ensaio, entre outras.

Como a compactação na dosagem Marshall é realizada por impactos e na dosagem *SUPERPAVE* por amassamento, a estrutura do esqueleto mineral das misturas moldadas por estes dois processos é diferente, ainda que sejam utilizados os mesmos agregados e mesmos teores e tipo de ligante no traço, o que pode resultar em valores diferentes para as propriedades mecânicas de MR e de RT (resistência à tração).

Pela revisão bibliográfica realizada, observa-se que os valores normalmente obtidos para módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente (CA, SMA, CPA, AB⁸, entre outras), variam de 2.000 a 8.000 MPa, em misturas ensaiadas a 25°C. Os menores valores de MR correspondem às misturas com asfaltos modificados por borracha ou polímeros e os valores mais elevados são relativos às misturas com asfaltos de consistência mais dura. As misturas com elevados valores de módulo de resiliência (entre 12.000 a 20.000 MPa), consideradas semi-rígidas do ponto de vista da deformabilidade, são indicadas para as camadas de base dos pavimentos (BERNUCCI, 2007).

Vários são os fatores que interferem no comportamento e desempenho dos concretos betuminosos usinados a quente:

- projeto e prática construtiva adequados às condições locais;
- características dos agregados e do ligante;
- método de compactação;
- temperaturas e umidade: a temperatura máxima a qual o ligante suporta sem oxidar (ou até mesmo queimar) pode ser determinada pela curva da Viscosidade

⁸ CA (concreto asfáltico); SMA (*stone matrix asphalt*); CPA (camada porosa de atrito) e AB (asfalto borracha).

Saybolt-Furol. Além disto, os agregados e ligantes devem estar livres de umidade;

- carregamentos e estado de tensões;
- envelhecimento: para limitar o risco de envelhecimento precoce do ligante, ou até mesmo a queima do CBUQ, deve-se evitar a temperatura excessiva durante o processo de mistura (usinagem) e espalhamento no pavimento e, também, o alto teor de vazios, pois o contato com o ar acarreta a oxidação lenta;
- aditivos.

A Tabela 12 apresenta as variáveis que interferem nas propriedades das misturas em função de suas características fundamentais.

Tabela 12 - Variáveis que afetam as propriedades da mistura (Fonte: MONISMITH *et al.*, 1989).

Propriedade	Definição	Exemplo de variáveis de mistura que têm influência
Rigidez	Relação entre tensão e deformação à determinada temperatura e tempo de carregamento	Granulometria Rigidez do asfalto Grau de compactação Sensibilidade à água Teor de ligante
Estabilidade	Resistência à deformação permanente (geralmente a altas temperaturas e longos tempos de carregamento)	Textura superficial do agregado Granulometria Rigidez do asfalto Grau de compactação Sensibilidade à água Teor de ligante
Durabilidade	Resistência ao intemperismo (ar, água) e à ação abrasiva do tráfego	Teor de ligante Granulometria Grau de compactação Sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Habilidade da mistura deformar-se sob carregamento repetido sem romper	Granulometria Teor de ligante Grau de compactação Rigidez do asfalto Sensibilidade à água
Características de fratura	Resistência da mistura sobre aplicação de carga	Granulometria Tipo de agregado Teor de ligante Grau de compactação Rigidez do asfalto Sensibilidade à água
Atrito	Habilidade da mistura de prover adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado	Textura do agregado Resistência ao polimento Granulometria Teor de ligante
Permeabilidade	Habilidade do ar, água e vapor d'água mover-se através da mistura	Granulometria Teor de ligante Grau de compactação

A FHWA – *Federal Highway Administration* (2002) apresentou um percentual de influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ:

- o atrito sofre 20% de influência do ligante e 80% do agregado;
- a fadiga sofre 60% de influência do ligante e 40% do agregado;
- o trincamento térmico (fissuras por retração) sofre 80% de influência do ligante e 20% do agregado.

3.2 CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ) COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

A busca pelo desenvolvimento sustentável em todas as esferas da infraestrutura de transportes está ganhando destaque por razões óbvias e pertinentes. Departamentos de Transportes, pesquisadores, construtores e fornecedores estão empenhados em desenvolver produtos e projetos de rodovias que representem um futuro mais sustentável. Na indústria de pavimentos asfálticos, um considerável número de inovações em materiais e tecnologias começa a ser explorado para averiguar a possibilidade de sustentabilidade para o projeto, a construção e a manutenção destes pavimentos. São exemplos as misturas asfálticas mornas, reciclagem dos pavimentos asfálticos, asfalto-borracha⁹, etc. Por outro lado, as pesquisas com agregados reciclados de concreto em misturas asfálticas (tema deste estudo) são raras e estão apenas começando.

Muitos países criaram leis para direcionar seus departamentos de transporte a investigar a possibilidade de uso de materiais recicláveis em obras de pavimentação. Nos Estados Unidos o governo tem incentivado a incorporação de borracha modificada (vulcanizada) nas misturas asfálticas. A seção 1.038 da Lei sobre Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície de 1991 (*Intermodal Surface Transportation Efficiency Act – ISTEA*), que trata do uso de material reciclado em pavimentação, visando à proteção ambiental, estabelece benefícios fiscais aos estados que cumprirem suas determinações e punições aos que não a obedecerem.

⁹ Asfalto-borracha são misturas asfálticas com agregados reciclados de pneus.

O *Federal Highway Administration* (FHWA, 1997) publicou uma ampla revisão sobre a utilização de subprodutos na construção de rodovias, que contempla de maneira generalista, a utilização de dezenove tipos de resíduos: pavimento asfáltico reciclado, cinza volante, cinza de termoelétrica, escória de aciaria, resíduo de incinerador, borrachas, tiras plásticas e fibras, vidro, entre outros.

Atualmente, a escória de aciaria e a borracha triturada de pneus inservíveis estão sendo testadas como agregados para as misturas asfálticas. A escória resulta de um processo industrial e a borracha é um material que já teve sua vida útil terminada, resultando em um reaproveitamento para outro fim.

Os agregados representam 90% a 95% em peso e 70% a 85% em volume do conjunto asfalto-agregado (INSTITUTO DO ASFALTO, 1989), representando a maior parcela constituinte da mistura asfáltica e, conseqüentemente, influenciando fortemente suas propriedades, sendo responsável principalmente pela capacidade de suporte dos pavimentos e resistência aos esforços gerados pelo tráfego.

Segundo o ALT-MAT (1999), o emprego de agregados reciclados de concreto em pavimentos é recomendado não apenas em bases granulares ou estabilizadas, os mesmos devem ser utilizados também em pavimentos rígidos (de concreto de cimento Portland) e ainda existem possíveis aplicações em misturas de concreto asfáltico a quente e em tratamentos superficiais.

A análise da viabilidade técnica e econômica do uso do agregado reciclado de concreto nas misturas asfálticas do tipo CBUQ está em fase inicial. Existem poucas e recentes pesquisas sobre o tema. Os pesquisadores ainda não apresentaram resultados conclusivos que possam levar a um consenso. Apenas com a continuação e o aprofundamento das pesquisas será possível afirmar algo sobre o desempenho e a durabilidade do CBUQ com uso do agregado reciclado de concreto. Para isto, é importante a realização de seções-teste e a aplicação do material em vias urbanas, pois nem sempre os resultados laboratoriais conseguem prever o comportamento em serviço. Ainda não existem normas que especifiquem os requisitos técnicos para que os agregados reciclados de concreto sejam aproveitados nestas misturas.

3.2.1 Experiência nacional

Frota *et al.*(2003) conduziram ensaios, em Manaus, para verificar a possibilidade de uso do agregado reciclado isento de materiais cerâmicos e gesso no próprio revestimento asfáltico. O

principal motivo da pesquisa deve-se ao fato de haver escassez de material pétreo na região Norte do país. Ao todo foram feitas três misturas pelo método Marshall: uma de referência, dosada com 100% de seixo rolado que é o material mais utilizado na região, apesar de não apresentar textura e angularidade adequadas. E as duas misturas de teste com 50% e 60% de agregado reciclado na fração graúda e areia e cimento (como fíler) na fração miúda. Os pesquisadores chegaram à conclusão que o uso deste agregado reciclado é tecnicamente viável, porém foi observado o acréscimo no teor ótimo do ligante. Na mistura de referência dosada com 100% de seixo rolado, obteve-se o teor ótimo de 5,5%. Para a mistura dosada com 50% de agregado reciclado, o teor ótimo subiu para 6,4% e para a mistura com 60% de agregado reciclado, 6,5%. Levando-se em conta apenas aspectos econômicos, tal fato pode, segundo os pesquisadores, desestimular o emprego dos agregados reciclados nas misturas, devido ao alto custo do ligante.

Frota *et al.* (2004) fizeram ensaios comparativos do desempenho de diferentes tipos de agregados encontrados em Manaus na produção de CBUQ. Os resultados demonstraram que as misturas com argila calcinada e com entulho reciclado apresentaram maiores estabilidades que a mistura com seixo (agregado comum na região), apesar deste ser individualmente mais resistente. Isto se deve, provavelmente, ao fato de que o seixo possui superfície lisa e forma arredondada, dificultando o intertravamento das partículas na mistura, conseqüentemente diminuindo a estabilidade do conjunto. A argila calcinada e o entulho reciclado possuem formas angulares e superfícies porosas, o que aumenta a resistência ao cisalhamento interno das misturas.

Frota *et al.* (2005) avaliaram a fluência de misturas asfálticas com agregados reciclados e CAP 50-60. Foram analisadas 3 misturas de CBUQ com teor de ligante de 8%, classificadas em três grupos segundo a graduação da zona de restrição *Superpave*: A (passando acima da zona de restrição), B (passando abaixo da zona de restrição) e C (entre a referida zona). Dentro de cada grupo, as amostras foram diferenciadas segundo o envelhecimento controlado em estufa não ventilada (600°C, 0h, 8h, 24h) e submetidas ao ensaio de fluência. Como resultados, os pesquisadores afirmam que as misturas envelhecidas apresentaram uma rigidez maior por conta da perda de material volátil do ligante. Tal fato é evidenciado pelo aumento do coeficiente angular da curva na região inicial de carregamento, bem como pelo patamar onde a fluência se torna mais próxima de valores constantes se obtido para valores menores de deformação. Este aumento da rigidez, provocado pelo envelhecimento do ligante nas misturas, torna o revestimento mais susceptível a microtrincas quando solicitado pelo tráfego,

levando a uma sensível diminuição na vida de fadiga deste material. Além disso, o Grupo C, que passa ao longo da zona de restrição, possui finos distribuídos de maneira mais irregular ao longo dos vazios existentes entre os agregados graúdos o que contribui para que a interação seja menos eficiente no momento em que ocorre a solicitação por parte do pavimento. As misturas dos Grupos A e B demonstraram resultados mais satisfatórios por conta de um melhor envolvimento dos finos ao longo dos vazios. Com relação ao envelhecimento das misturas, o mesmo é acelerado pelas altas temperaturas e elevados índices pluviométricos, pois a torna mais frágil e quebradiça, propensa à formação de trincas (FROTA *et al.*, 2005).

Com relação ao processo de envelhecimento das misturas, segundo Greco (2004), este ocorre segundo duas fases: a primeira, de curto prazo, ocorre durante a construção do revestimento, quando a mistura ainda está quente e se dá, essencialmente, pela perda de componentes voláteis e oxidação do asfalto; a segunda, de longo prazo, se dá em campo durante a vida útil do revestimento e ocorre por ação conjunta da oxidação dos componentes do ligante, perda de componentes oleosos por absorção do agregado ou por ação da radiação solar, em especial, na superfície. Faltam dados que relacionem estudos em laboratório com o comportamento em campo. Tal fato cria discordância com relação a melhor maneira de se realizar simulações de envelhecimento, especialmente a longo prazo, uma vez que ensaios acelerados que simulem esta fase do fenômeno, quando realizados a altas temperaturas, trazem resultados que não representam o real desempenho em campo, visto que o mecanismo de envelhecimento quando o ligante é submetido a altas temperaturas é muito diferente daquele que ocorre a baixas temperaturas.

Em Goiânia/Goiás, Guimarães *et al.* (2005) em parceria com FURNAS Centrais Elétricas S.A. analisaram misturas asfálticas do tipo CBUQ, dosadas pelo método Marshall na faixa C do DNIT, com CAP 20 e com agregados mistos (compostos de resíduos de concreto, de argamassa e cerâmicos) e agregados de concreto compactado a rolo (CCR¹⁰). A mistura de referência foi realizada com micaxisto (agregado natural da região). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Asfalto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas.

¹⁰ Concreto compactado a rolo, também conhecido como concreto rolado, é bastante utilizado em barragens, aeroportos e pavimentos rígido. É um concreto seco, com consistência e trabalhabilidade tal que permite sua compactação através de rolos compressores.

Os resultados da caracterização dos agregados utilizados por Guimarães *et al.*(2005) estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados de caracterização dos agregados (Fonte: Guimarães *et al.*, 2005).

Tipo de entulho	Descrição dos agregados	Densidade de massa real (kg/m ³)	Abrasão Los Angeles (%)	Índice de forma	Durabilidade ao ataque de Na ₂ SO ₄ (%)	Adesividade	Equivalente de areia (%)
Misto	Areia	2,64	—	—	1,5	Boa	54
	Brita 9,5	2,61	51 “C”	1,9	2,4	Boa	—
	Brita 19	2,23	45 “B”	2,0	4,7	Boa	—
Concreto (Pista de CCR)	Areia	2,54	—	—	—	Boa	57
	Brita 19	2,68	33 “B”	0,9	2,75	Boa	—
Agregado de Goiânia	Areia	2,72	—	—	—	Boa	59
	Brita 9,5	2,68	27 “B”	0,6	0,11	Boa	—

Os resultados dos parâmetros volumétricos da dosagem Marshall estão apresentados nas Tabelas 14 e 15 a seguir.

Tabela 14 – Parâmetros volumétricos da mistura com agregado misto (Fonte: Guimarães *et al.*, 2005).

Parâmetros	Porcentagem de ligante						Especificação
	8	9	10	11	12	13	
Densidade Aparente (g/cm ³)	1,923	1,939	1,974	2,003	1,988	1,971	—
Vazios (%)	18,7	16,8	14,1	11,6	11,1	10,6	3 a 5
RBV (%)	43	49	55	61	64	66	75 a 82
Estabilidade mínima (N)	10.300	10.930	11.320	12.410	9.870	7.840	2.500
Fluência (0,1 mm)	23	22	20	23	31	41	20 a 46

Tabela 15 - Parâmetros volumétricos da mistura com agregado de CCR (Fonte: Guimarães *et al.*, 2005).

Parâmetros	Porcentagem de ligante						Especificação
	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,5	4,5 a 9,0
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,193	2,215	2,228	2,251	2,245	2,246	—
Vazios (%)	8,5	6,9	5,7	4	3,6	2,1	3 a 5
RBV (%)	62	68	73	80	83	89	75 a 82
Estabilidade mínima (N)	11.350	12.010	12.870	12.710	11.780	7.430	2.500
Fluência (0,1 mm)	32	23	25	28	32	58	20 a 46

Guimarães *et al.* (2005) concluíram que:

- o desgaste por abrasão *Los Angeles* do ARM (agregado reciclado misto) ficou acima do especificado na norma DNER-ME 035/98. Quanto ao ARC (agregado reciclado de concreto), apesar de apresentar maior desgaste que a brita natural, ficou dentro do limite estabelecido pela Norma;
- os resultados de índice de forma, durabilidade, adesividade e equivalente de areia indicaram que, tanto o ARM quanto o ARC estavam adequados para uso em misturas betuminosas;
- o Vv(%) e a RBV(%) do agregado de CCR (concreto compactado a rolo) cumpriu as exigências da norma DNER-ES 313/97 (Pavimentação - concreto betuminoso) para um teor de projeto de 8,0%. No entanto, o agregado misto, mesmo com alto teor de CAP (13%), obteve resultados em desacordo com os parâmetros especificados: volume de vazios (%) variando entre 10,6% e 18,7%, bem acima da faixa normatizada (3% a 5%) e baixa relação betume/vazios, entre 43% e 66%, abaixo do que determina a norma (75% a 82%). Os agregados mistos não são indicados para uso em misturas betuminosas;
- as misturas com agregado reciclado de CCR apresentaram teor “ótimo” de ligante 8%;
- a mistura de referência, com agregado natural de Goiânia, apresentou teor “ótimo” de ligante 5,5%.

Apesar das misturas com agregado de CCR estarem de acordo com as especificações, apresentaram alto consumo de CAP quando comparadas à mistura de referência. O elevado teor de projeto foi atribuído à alta porcentagem de vazios decorrentes da porosidade e absorção dos agregados reciclados.

A mistura com agregado de CCR apresentou um custo cerca de 33,6% mais elevado que a mistura de referência. No entanto, segundo dados do mesmo ano em que foi realizada a pesquisa, 2005, a Prefeitura Municipal de Goiânia gasta 2 milhões de reais/mês com a remoção do RCC disposto de forma irregular pela cidade. Este valor seria suficiente para produzir mais de 19.000 toneladas/mês de CBUQ.

Ron *et al.* (2008) avaliaram as características do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) produzido com agregados reciclados graúdos e miúdos tipo ARC (agregado de resíduos de concreto) obtidos na usina de reciclagem USIFORT de Fortaleza, CAP 50-70 da LUBNOR (Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste) e carbonato de cálcio da Carbomil como fíler para preenchimento dos vazios da mistura. O procedimento de dosagem seguiu a metodologia Marshall e a faixa granulométrica C do DNIT. Antes da realização das misturas asfálticas, o resíduo passou por um processo de seleção, onde foram descartados materiais cerâmicos, gesso, vidro e ferragens. Os resultados obtidos na caracterização dos agregados reciclados estão na Tabela 16.

Tabela 16 – Propriedades dos agregados reciclados utilizados na pesquisa de Ron *et al.* (2008).

Propriedade	Resultado
Densidade de massa real (kg/l)	2,60
Densidade de massa aparente (kg/l)	2,44
Densidade miúdo (kg/l)	2,54
Abrasão Los Angeles (%)	40,78
Absorção de água (%)	2,60
Índice de forma	0,73

Fonte: Ron *et al.*, 2008.

Como resultados dos estudos de Ron *et al.* (2008), pode-se citar:

- aumento do teor de ligante de 5,7% para 7,6% nas misturas em que houve substituição de agregado natural por agregado reciclado;
- o aumento do teor de ligante, a modificação da granulometria e o aumento do número de golpes não foram suficientes para reduzir o volume de vazios, que

permaneceu superior a 7%. A redução desse valor só foi possível com a substituição do fíler proveniente do RCC por carbonato de cálcio. O volume de vazios chegou a apenas 2% quando se usou 80% de carbonato de cálcio e 20% de fíler de RCC;

- os resultados de resistência à tração por compressão diametral (RT) e de módulo de resiliência (MR) são de mesma ordem de grandeza para o CBUQ produzido com agregado natural e reciclado. Entretanto, o CBUQ produzido com agregado reciclado possui menor relação MR/RT (3.151) que o CBUQ produzido com agregado natural (3.429). Este resultado geralmente é utilizado como parâmetro indicador da vida de fadiga das misturas. Considera-se que valor inferior é satisfatório por indicar maior flexibilidade (menor MR) e maior resistência (maior RT);
- o CBUQ com agregado reciclado apresentou maior vida de fadiga que o produzido com agregado natural para os níveis de tensões de 30%, 40% e 50% da resistência à tração por compressão diametral (RT);
- o agregado reciclado apresentou melhores resultados de abrasão *Los Angeles* e índice de forma que a brita convencional.

Silva (2009) estudou o agregado reciclado de concreto para uso em misturas asfálticas destinadas a vias urbanas com baixo volume de tráfego. O agregado reciclado utilizado, proveniente de Usina de Reciclagem da SLU/BR 040 em Belo Horizonte¹¹, apresentou as seguintes características:

- 89% de materiais cimentícios, absorção elevada, entre 8% e 10% e porosidade acentuada variando entre 17% e 20%;
- desgaste por abrasão *Los Angeles* de 47%, respeitando os parâmetros estabelecidos pelo DNIT para o concreto asfáltico;
- perda ao choque no aparelho Treton média de 52,4%, dentro do limite máximo estabelecido pela norma DNER-ME 399/99 de 60%;

¹¹ SLU/BR 040 – Superintendência de Limpeza Urbana de Minas Gerais, localizada às margens da BR 040.

- durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio pela norma DNER-ME 089/94 de 14%. A norma 031/2006 do DNIT recomenda que a perda máxima seja de 12%, portanto, o resultado encontrado está um pouco acima do limite especificado;
- a resistência à degradação e desintegração pelo índice de degradação Washington (IDw), pelo método DNER-ME 397/99 pode variar de 0 a 100. O IPR sugere que os valores superiores a 30 estão dentro do limite de aceitação (BERNUCCI *et al.*, 2007). O RCC avaliado apresentou IDw de 4,3, indicando baixa resistência à degradação e desintegração;
- adesividade ao ligante satisfatória;
- índice de forma igual a 0,88 indicando um agregado de boa cubicidade, qualidade importante para misturas asfálticas;
- o equivalente de areia pelo método DNER-ME 054/97 deve ser igual ou superior a 55%. No material estudado, o equivalente de areia médio foi igual a 57,8%.

As misturas foram dosadas pelo método Marshall, nas faixas B e C do DNIT, utilizando-se ligantes CAP 30/45 e CAP 50/70 e material de enchimento (fíler) cal cálcica hidratada. As propriedades mecânicas analisadas através dos ensaios laboratoriais foram: módulo de resiliência, resistência à tração e deformação permanente. Os resultados obtidos nos ensaios foram satisfatórios (Tabela 17).

Tabela 17 – Resultados do módulo de resiliência e da resistência à tração, a 25°C (Fonte: SILVA, 2009).

Misturas	Teor de ligante (%)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
M I – faixa C – CAP 50/70	9,5	3.864	0,63	6.133
M II – faixa B – CAP 50/70	9,0	3.305	0,51	6.480
M III – faixa C – CAP 30/45	9,5	6.000	1,04	5.769
M IV – faixa B – CAP 30/45	9,0	7.223	1,20	6.019

Nas misturas dosadas com CAP 30/45, a RT da faixa B ficou 15% acima do valor de RT da faixa C. Inversamente, nas misturas com CAP 50/70, o valor de RT para a faixa C foi 24% superior ao valor de RT da faixa B.

O pesquisador observou que, nas misturas dosadas na faixa C, com o ligante mais consistente (CAP 30/45), as características mecânicas foram melhoradas, comparando-se com a mesma mistura realizada com o CAP 50/70. Embora o volume de vazios nas duas misturas tenha sido semelhante, a mistura com CAP 30/45 apresentou-se mais coesa, com maiores valores de estabilidade e resistência à tração e valores de fluência em torno de 25% abaixo dos da mistura com o CAP 50/70, indicando menor tendência à deformação permanente. Conseqüentemente, nos ensaios de desgaste Cântabro, os resultados foram mais satisfatórios para as misturas dosadas com o CAP 50/70. A maior rigidez do corpo de prova dosado com o CAP 30/45 fez com que as arestas ficassem mais frágeis e quebradiças. Nos corpos de prova dosados com CAP 50/70 a menor rigidez facilitou a deformação das arestas evitando a quebra e perda de massa.

Comparando-se as misturas dosadas na faixa B com as da faixa C, percebeu-se que as da faixa B possuíam maior tendência à deformação permanente. A estabilidade em ambas as faixas tende a reduzir acentuadamente com o aumento no teor de ligante.

Tanto nas misturas dosadas na faixa B quanto nas da faixa C, com o uso do ligante mais consistente (CAP 30/45) os resultados foram mais satisfatórios que nas misturas com CAP 50/70. Por outro lado, o pesquisador constatou que a absorção do ligante, devido à alta porosidade (17% a 20%) dos agregados estudados, é 73% mais elevada nas misturas com CAP 30/45 da faixa B e 62% maiores nas misturas da faixa C com o mesmo ligante, quando comparadas às misturas com CAP 50/70. O CAP 30/45 possui maior sensibilidade à alta temperatura de mistura. Nas misturas com CAP 30/45 na faixa B, foram absorvidos 38% do ligante contra 19% da mistura na faixa B com CAP 50/70. No caso das misturas da faixa C, a absorção do ligante chegou a 41% com CAP 30/45 e 22% com CAP 50/70.

As relações entre vazios preenchidos por betume e os vazios totais ficaram dentro dos parâmetros usuais. Entretanto, em todas as misturas realizadas, os teores de projeto de ligante variaram entre 9,0% e 9,5%. Acima do comumente utilizado na região, nas misturas realizadas com agregado natural.

3.2.2 Experiência internacional

Na Austrália, Paranavithana *et al.*, (2006), estudaram os efeitos dos agregados reciclados de concreto nas propriedades do concreto asfáltico. Os resultados obtidos demonstraram que:

- a densidade, os vazios do agregado mineral e a espessura do filme de ligante sobre os agregados das amostras de concreto asfáltico compactado contendo ARC foram menores que nas amostras da mistura de controle;
- o volume de vazios foi maior para as amostras com agregados reciclados de concreto;
- o módulo de resiliência das misturas com ARC diminuiu com o aumento na quantidade de ligante, e os valores de MR encontrados para estas misturas foram significativamente menores quando comparados aos valores correspondentes da mistura de controle. Provavelmente devido à presença de argamassa de baixa resistência aderida aos agregados reciclados. No entanto, estes valores estavam dentro dos limites aceitáveis recomendados pelo *Austroads Pavement Research Group*;
- o módulo de resiliência cresceu com o aumento do nível de compactação, mesmo assim, as misturas com ARC apresentaram menores valores de rigidez/módulo de resiliência que a mistura de controle;
- o aumento no nível de compactação melhorou o módulo de resiliência e a capacidade de suporte e diminuiu a fluência;
- com relação ao ensaio de *creep* e fluência, as misturas com ARC apresentaram resultados semelhantes aos da mistura de controle.

Os experimentos foram realizados à temperatura de 50°C (considerada maior temperatura de serviço).

Os pesquisadores também compararam os resultados obtidos nos ensaios de densidade real, densidade aparente e absorção dos ARC, do agregado natural de basalto e da combinação do ARC com o agregado natural. Devido à alta porosidade e baixa densidade das partículas de argamassa de cimento ligadas ao ARC, observou-se que os ARC apresentaram menores densidades e absorção à água bem superior quando comparados aos agregados naturais de basalto. O potencial de degradação do ARC é significativamente maior que no agregado de basalto. Os vazios do agregado mineral das misturas com agregados reciclados são relativamente menores que na mistura de controle, devido à maior absorção de ligante pelo

ARC. Entretanto, apesar dos ensaios indicarem diferenças entre os agregados, os pesquisadores consideram que os resultados são encorajadores.

Em 2007, numa pesquisa realizada em Singapura, Wong *et al.*(2007) investigaram a viabilidade da substituição do agregado granítico natural por 6% de agregado de concreto (< 0,075 mm) não tratado termicamente, 45% de agregado de concreto (< 3,15 mm) não tratado termicamente e 45% de agregado de concreto (< 3,15 mm) tratado termicamente em misturas asfálticas do CBUQ. As misturas foram projetadas pelo método Marshall com CAP classificado por penetração, naquele país, como 60/70. Como resultados, tem-se:

- os resultados dos ensaios de estabilidade, fluência, volume de vazios e RBV, indicaram que o teor ótimo de ligante das três misturas foi de 5,3%, 6,5%, 7,0%, respectivamente. O maior teor de ligante obtido para mistura com 45% de agregado de concreto termicamente tratado pode ser parcialmente atribuído à textura mais porosa da superfície do agregado de concreto;
- os ensaios dos parâmetros volumétricos da dosagem Marshall demonstraram que os resultados respeitaram os limites impostos pelo caderno de encargos, com exceção dos valores da RBV ligeiramente inferiores em duas das misturas híbridas;
- os resultados da análise de espectroscopia de fluorescência por raio X indicaram que o cálcio, o silício e o alumínio são os três principais elementos presentes no concreto não tratado termicamente. Com concentrações de silício de aproximadamente 27% em peso e 12% de cálcio. Os ensaios de difração em raio X mostraram a presença de cal no concreto tratado termicamente. O microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostrou uma perspectiva mais aprofundada dos grãos de agregados de concreto nas misturas de CBUQ. O processo de calcinação pelo qual os grãos de concreto tratados termicamente passaram serviu para converter o carbonato de cálcio (calcita) presente no concreto em cal livre (óxido de cálcio). O tratamento térmico (calcinação) no agregado de concreto, que resultou em descarbonatação, foi realizado em função da descoberta observada por autoridades rodoviárias de Singapura de que a inclusão de cal hidratada nas misturas asfálticas a quente acrescenta anos à vida útil da mistura (National Lime Association, 2004). Os efeitos químicos reduzem o potencial de desagregação e de envelhecimento pelo impacto do endurecimento oxidativo. O preenchimento pelo calcário melhora a resistência à deformação a altas temperaturas e aumenta a resistência ao trincamento a baixas temperaturas. Essas alterações ajudam a

criar pavimentos com melhores perspectivas de durabilidade. Verificou-se através desse estudo que a cal pode ser obtida através da calcinação do concreto;

- nos ensaios de módulo de resiliência realizados a temperaturas mais altas, foram obtidos menores valores de MR, basicamente devido a uma mistura mais macia (com menor rigidez) à temperatura mais elevada. Os resultados de MR das misturas híbridas com 6% de concreto foram semelhantes aos da mistura de referência. O MR do CBUQ com 45% de concreto tratado termicamente foi pouco menor que na mesma mistura com concreto não tratado termicamente. Embora a mistura híbrida tenha alcançado uma melhor capacidade de carga, fez-se notar que necessita de um teor mais elevado de ligante;
- no ensaio de *creep* dinâmico, a mistura com 6% de substituição de agregado granítico natural por agregado de concreto apresentou resultados semelhantes à mistura padrão. As misturas com 45% de agregado de concreto apresentaram maior resistência à deformação permanente que a mistura de referência. Nas misturas com 45% de substituição de concreto tratado termicamente a resistência à deformação permanente foi maior quando comparada às demais misturas. A cal livre produzida no concreto tratado termicamente, conforme indicado pelo ensaio de difração de raio X, pode ter ajudado a melhorar o desempenho da mistura quanto à deformação por fluência. Apesar de o agregado de concreto possuir maior cubicidade que o agregado natural de granito, sob compactação os finos de concreto podem quebrar, gerando mais finos que preenchem os vazios das misturas de CBUQ, melhorando assim a integridade estrutural da mistura. Isto dá uma possível explicação para maiores valores de módulo de elasticidade. Além disso, a estrutura porosa também se traduz em mais vazios e uma maior área de superfície, requisitando assim uma maior porcentagem de ligante. No entanto, uma estrutura mais porosa preenchida com o ligante, pode gerar uma mistura mais elástica, resultando em maior resistência à deformação;
- os resultados promissores mostraram que é viável a substituição parcial do agregado natural pelo reciclado de concreto em misturas asfálticas a quente, dosadas pelo método Marshall.

Nos Estados Unidos, Mills-Beal; You, (2010), do *Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University*, pesquisaram as propriedades mecânicas de misturas asfálticas a quente com agregados reciclados de concreto para rodovias de baixo volume de tráfego, baseando-se na hipótese de que o agregado reciclado de concreto poderá apresentar um melhor desempenho quando em pavimentos menos solicitados. Neste estudo, o agregado natural foi substituído pelo agregado reciclado de concreto em proporções que variaram de 25%, 35%, 50% e 75%. Pela metodologia de dosagem e especificações de teste do *Superpave*, os resultados dos testes indicaram:

- vantagens na substituição de agregados naturais pelos reciclados até 75%. Acima de 75%, os pesquisadores acreditam que não irá satisfazer aos critérios especificados;
- o MR diminuiu com o aumento na quantidade de ARC (agregados reciclados de concreto) na mistura, entretanto, os resultados sofreram mais influência pela temperatura de teste que pela variação na quantidade de agregados de concreto;
- os ensaios de MR foram realizados a 5°C, 25°C e 40°C. Os resultados indicaram um aumento no MR com a diminuição da temperatura de ensaio;
- à proporção que aumentou a quantidade de agregado reciclado de concreto, ocorreu a absorção de uma parcela do asfalto pelos poros do agregado, reduzindo o conteúdo efetivo de asfalto na mistura;
- as misturas com agregado reciclado de concreto tiveram os VAM diminuídos à medida que aumentava a proporção do agregado reciclado, os pesquisadores acreditam que, devido à superfície porosa do agregado reciclado de concreto, pode ter havido absorção do ligante, diminuindo os VAM¹²;
- a RBV¹³ diminuiu à medida que a proporção de agregado de concreto aumentou nas misturas;
- quanto maior a quantidade de ARC nas misturas, maiores os danos por umidade;

¹² Porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM) é a soma do volume de vazios (Vv) não preenchidos pelo ligante, com os vazios preenchidos pelo ligante. É o volume total de vazios da mistura.

¹³ A Relação Betume/Vazios (RBV) é a relação entre o volume de ligante e o volume total de vazios da mistura (VAM).

- de acordo com as especificações do MDOT (*Michigan Department of Transportation*), as deformações permanentes das misturas asfálticas a quente devem ser de, no máximo, 8 mm para aplicação de até 8.000 ciclos de carregamento. As deformações permanentes aumentaram com o acréscimo de ARC nas misturas, mas os limites estabelecidos pelo MDOT foram satisfeitos, obtendo valores máximos de 6 mm;
- para as misturas híbridas com quantidade de ARC:
 - entre 25% e 35%, houve um aumento de 8,1% nas deformações permanentes;
 - entre 35% e 50%, houve um aumento de 37,85% nas deformações permanentes;
 - entre 50% e 75%, houve um aumento de 76% nas deformações permanentes.

Os pesquisadores concluíram que o ARC é capaz de substituir satisfatoriamente o agregado natural, em misturas asfálticas a quente, para rodovias de baixo volume de tráfego. Os resultados dos ensaios demonstraram que as deformações permanentes não serão problema nas misturas com até 75% de agregado reciclado de concreto. Não se aconselha a substituição do agregado virgem pelo ARC acima do percentual de 75%.

Na China, uma recente pesquisa realizada por Chen *et al.* (2011), avaliou o potencial de uso do pó resultante da reciclagem de resíduos de concreto como fíler para concreto betuminoso usinado a quente, substituindo totalmente o pó calcário convencional. Foram avaliadas as propriedades do pó de concreto reciclado através dos ensaios de difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X. As misturas asfálticas com adição do pó reciclado foram avaliadas através de testes de resistência à tração, módulo de resiliência, *creep* dinâmico e fadiga, comparando-se os resultados com uma mistura de referência dosada com pó calcário. Os resultados indicaram que o pó dos agregados de concreto pode melhorar as propriedades das misturas asfálticas, inclusive a sensibilidade à água e a resistência à fadiga. No entanto, pode ocorrer uma diminuição no desempenho a baixas temperaturas. Todos os resultados indicaram que o pó do agregado reciclado de concreto pode ser utilizado em pavimentação asfáltica, especialmente em regiões de clima quente.

Pérez *et al.* (2010), avaliaram, na Espanha, a possibilidade de projetar CBUQ para pavimentos rodoviários com agregados graúdos reciclados de construção. As percentagens de agregados reciclados utilizados nas misturas foram: 20%, 40% e 60%. Cimento e cal foram utilizados como fíler. As misturas realizadas com agregados graúdos reciclados respeitaram as especificações Marshall para estradas de baixo volume de tráfego. As misturas também mostraram boa resistência às deformações permanentes. No entanto, os pesquisadores suspeitam que o CBUQ com agregados reciclados pode ter durabilidade insuficiente, devido a sua alta sensibilidade à ação da água.

Pela revisão bibliográfica realizada pela autora, todas as pesquisas (SHEN; DU, 2004; ALJASSAR; AL-FADALA, 2005; FROTA *et al.*, 2005; GUIMARÃES *et al.*, 2005; PARANAVITHANA; MOHAJERANI, 2006; WONG *et al.*, 2007; RON *et al.*, 2008; SILVA, 2009; MILLS-BEALE; YOU, 2010; PÉREZ *et al.*, 2010) encontraram resultados satisfatórios para RT e MR, em CBUQ dosados com agregados reciclados de concreto.

3.3 MÉTODO DE DOSAGEM MARSHALL

No Brasil, os projetos de misturas asfálticas são executados quase que exclusivamente de acordo com a metodologia Marshall. Tal metodologia foi desenvolvida nos Estados Unidos, na década de 30, por Bruce G. Marshall, do Departamento de Transportes do Estado do Mississippi. Idealizada para determinar a quantidade de ligante (teor de projeto) a ser utilizada na composição de misturas betuminosas destinadas à pavimentação, baseia-se nos valores de densidade e volume de vazios, estabilidade e fluência. Como consequência dos avanços internacionais, novos ensaios têm se tornado rotina: módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral (DNER, 1984; DNER, 1986).

Durante a segunda guerra mundial, o crescente aumento de cargas e das pressões dos pneus dos aviões militares (pesados aviões de bombardeio), impulsionou o Corpo de Engenheiros do Exército Americano a comparar, dentre os métodos de dosagem e controle de qualidade das misturas asfálticas a quente disponíveis, o mais simples, prático e eficiente. Optou-se pelo método Marshall, pois aliado a tais características, possui portabilidade e fácil disponibilidade dos equipamentos necessários à realização dos ensaios requeridos. Como consequência, o exército desenvolveu um vasto estudo sobre o método adotado, tornando-o conhecido e utilizado internacionalmente.

Na dosagem das misturas asfálticas pelo método Marshall são considerados os seguintes parâmetros:

- granulometria: deve ser dosada de tal forma que fique próxima a máxima densidade para garantir a melhor estabilidade da mistura;
- densidade aparente da mistura considerando-se os vazios com ar;
- densidade máxima teórica da mistura: supondo-se a densidade da mistura sem os vazios;
- volume de vazios da mistura ($V_v\%$): é o volume de ar existente numa mistura compactada, em relação ao volume total. Deve variar de 3% a 5% em camadas de rolamento e de 4% a 6% para camadas de ligação (*binder*), que é a camada subjacente a de rolamento. Este volume de vazios assegura que não ocorrerá afluência do ligante à superfície da mistura, devido à expansão decorrente do aumento da temperatura em serviço. Um elevado volume de vazios poderá ocasionar um rápido endurecimento e oxidação do ligante e consequente deterioração prematura da mistura exposta às condições ambientais de uso, causando a desintegração do revestimento asfáltico;
- vazios do agregado mineral ($VAM\%$): vazios intergranulares da mistura compactada, incluindo o volume de ar e de asfalto, em relação ao volume total. Variam de acordo com o tamanho máximo nominal (TMN) do agregado utilizado na mistura, pela Norma DNIT 031/2006-ES, variam de 13% a 18%. Quanto maior o TMN, menor o $VAM\%$ (mínimo);
- relação betume/vazios ($RBV\%$): percentagem de vazios intergranulares do agregado mineral preenchidos com cimento asfáltico e serve para garantir que os vazios do agregado mineral sejam preenchidos por uma quantidade razoável deste ligante. Valores de RBV muito baixos podem comprometer a durabilidade das misturas e, do contrário, quando muito elevados afetam a estabilidade. Varia de 75% a 82% para camadas de rolamento e de 65% a 72% para camadas de ligação (*binder*);
- estabilidade (E): carga sob a qual o corpo de prova é rompido quando submetido a uma compressão radial semiconfinada. A estabilidade mínima exigida pelo método de ensaio DNER-ME 043/95, para 75 golpes é 500 Kgf;
- fluência (F): deformação total sofrida pelo corpo de prova ao romper-se na compressão semiconfinada.

O comportamento das misturas betuminosas vem sendo estudado com afinco em diversos países do mundo. Percebe-se uma forte tendência de se adequar métodos antigos e projetar as misturas de acordo com as solicitações de tráfego, estrutura, condições climáticas e demais peculiaridades de cada região, criando-se novas misturas. Como consequência dos avanços internacionais, alguns ensaios têm sido acrescentados à rotina dos projetos de camadas asfálticas como, por exemplo, os ensaios de módulo de resiliência (MR), resistência à tração (RT) e vida de fadiga, escolhidos pela autora para a caracterização mecânica das misturas estudadas, complementando os resultados do ensaio de estabilidade (E) e fluência (F).

Com relação às propriedades de MR e RT, estudos realizados em outros estados brasileiros (FROTA *et al.*, 2005; GUIMARÃES *et al.*, 2005; RON *et al.*, 2008; SILVA, 2009), indicam resultados satisfatórios para o uso dos agregados reciclados de construção civil nas misturas asfálticas. Ron *et al.* (2008) comprovaram que o agregado reciclado possui menor relação MR/RT e maior resistência à fadiga e sugerem que a relação MR/RT esteja correlacionada à vida de fadiga.

Brown; Cross (1991) realizaram um amplo estudo em rodovias norte-americanas e ressaltaram a importância de manter o volume de vazios acima de 3% (mesmo após adensamento pelo tráfego) e da utilização de agregados com faces britadas para evitar o afundamento em trilhas de rodas.

O volume de vazios é um dos fatores condicionantes que mais afeta a durabilidade das misturas asfálticas em serviço. A permeabilidade das misturas sofre influência de diversos fatores, porém as normas nacionais e internacionais fixaram, arbitrariamente, os valores de $V_v\%$ e acredita-se que: volume de vazios baixos, entre 3% e 5% indicam misturas impermeáveis, enquanto que volume de vazios elevados, maiores que 14% conduzem a misturas permeáveis. Hicks (1991) define a faixa intermediária (com V_v entre 8% e 13%) como “*pessimum air voids*”, considerada indesejável devido à possibilidade da entrada de água por gravidade no interior da mistura e retenção desta água, que não consegue sair, pois na faixa intermediária a mistura não possui vazios suficientes para ser drenante.

Segundo o AI (1998), o volume de vazios ($V_v\%$) é a propriedade volumétrica mais importante do concreto asfáltico, pois, os vazios de ar dentro da mistura compactada irão permitir a expansão térmica dos ligantes e suportar a compactação causada pelo tráfego. Volumes de vazios muito baixos, abaixo de 3% comprometem o desempenho das misturas

quanto ao afundamento em trilhas de rodas, por outro lado, $V_v\%$ elevados, acima de 8% comprometem a durabilidade do pavimento. Misturas com $V_v\%$ entre 6% e 13% não são consideradas nem impermeáveis nem drenantes, tornando-se mais susceptíveis ao dano por umidade induzida.

Segundo SOARES *et. al.* (2000), nos últimos anos os parâmetros de estabilidade e fluência estão sendo menos importantes para a determinação do teor de projeto do ligante asfáltico, que parâmetros volumétricos como volume de vazios ($V_v\%$) e relação betume/vazios (RBV%).

O método Marshall não fornece as propriedades das misturas compactadas relacionadas ao dimensionamento dos pavimentos nem ao desempenho em serviço, os ensaios visam auxiliar na escolha do teor (“ótimo”) de projeto.

Em um estudo realizado por Aldigueri *et al.* (2001), os pesquisadores verificaram uma diferença de 0,6% no teor de projeto entre misturas executadas com compactador manual e outras com compactador automático. Devido a variações na frequência de aplicação dos golpes, ocorrem diferenças nos resultados das densidades aparentes e dos volumes de vazios das misturas. Neste estudo os corpos de prova foram todos compactados com soquetes manuais.

Von Quintus *et al.* (1989) apresentaram uma nova proposta de projeto para misturas asfálticas, o *Asphalt-Aggregate Mixtures Analysis System* (AAMAS), na qual as ferramentas tradicionalmente utilizadas são complementadas com outros ensaios, que representam características fundamentais das misturas, tais como: módulo de resiliência, vida de fadiga, deformação permanente e *creep*. Os pesquisadores ressaltam a necessidade de reprodução das características de compactação do campo em laboratório para a adequada caracterização e escolha dos materiais.

No entanto, na Europa, é comum a verificação da relação estabilidade/fluência, pois, o valor da estabilidade indica, indiretamente, o intertravamento, a coesão e o atrito entre as partículas, além da sua resistência ao cisalhamento e a fluência sugere a elasticidade da mistura. Desta forma, Ogurtsova *et al.* (1999) chegaram à conclusão que o binômio estabilidade-fluência poderá indicar o desempenho das camadas betuminosas de um pavimento. Valores de estabilidade acima de 5kN, considerados altos, quando associados a pequenos valores de fluência, abaixo de 5mm, sugerem que as misturas são capazes de suportar os esforços de um tráfego médio, sem apresentarem deformações significativas.

4. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais e métodos utilizados nos experimentos e suas procedências. Devido ao grande número de variáveis envolvidas, o planejamento experimental foi separado em três partes:

- 1) Coleta e caracterização dos materiais:
 - Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP);
 - Agregados reciclados;
 - Agregados naturais.
- 2) Determinação dos 5 traços experimentais, dosagem das misturas pelo método Marshall e avaliação das propriedades volumétricas e mecânicas (estabilidade e fluência);
- 3) Realização dos ensaios complementares para caracterização mecânica do CBUQ:
 - Módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica (MR);
 - Resistência à tração estática por compressão diametral (RT);
 - Vida de fadiga a tensões controladas (20%, 30%, 40% e 50% do valor da resistência à tração).

Algumas questões orientaram o desenvolvimento desta pesquisa: que aspectos diferem o agregado reciclado de concreto da brita natural? Qual a influência da adição dos agregados reciclados de concreto, com suas características específicas, no consumo de ligante? Existem diferenças entre as propriedades volumétricas e mecânicas do CBUQ com agregado reciclado de concreto e do CBUQ convencional (com agregado natural)? Quais? Quais as potencialidades e possíveis limitações dos concretos asfálticos produzidos com o agregado reciclado de concreto?

4.1 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) utilizado na pesquisa é proveniente do petróleo nacional Fazenda Alegre, fornecido pela Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste (LUBNOR)¹⁴ e gentilmente cedido pelas usinas de asfalto Andrade Guedes e Lidermac.

Os ensaios de caracterização foram realizados pelo Laboratório AB-UN/LUBNOR, em Fortaleza/Ceará.

De acordo com a nova especificação brasileira da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2005), este ligante é caracterizado por penetração como um CAP 50/70. Suas propriedades convencionais estão de acordo com todas as especificações da ANP, conforme Tabela 18.

Tabela 18 - Características convencionais do CAP utilizado na pesquisa.

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	ASTM D5	50 a 70	64	0,1 mm
Ponte de Amolecimento	ASTM D36	46 mín.	50,8	°C
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E102 ASTM D 2161	141 mín.	308	s
Viscosidade Brookfield a 135°C-SP21 20RPM	ASTM D4402	274 mín.	607	cp
Viscosidade Brookfield a 150°C-SP21	ASTM D4402	112 mín.	290	cp
Viscosidade Brookfield a 177°C-SP21	ASTM D4402	57 a 285	103	cp
RTFOT Penetração Retida	ASTM D5	55 mín.	61	%
RTFOT Aumento do Ponto de Amolecimento	ASTM D36	8 máx.	6,4	°C
RTFOT Ductilidade a 25°C	ASTM D113	20 mín.	>150	cm
RTFOT Variação em % Massa	ASTM D2872	0,5 máx.	0,096	%
Dutilidade a 25°C	ASTM D113	60 mín.	>150	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	ASTM D2042	99,5 mín.	100,0	% massa
Ponto de Fulgor	ASTM D92	235 mín.	292	°C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X018	-1,5 a 0,7	-0,4	N/A
Aquecimento a 177 °C	X215	NESP (1)	NESP	N/A

Nota: (1)NESP = Não espuma

Fonte: Laboratório AB-UN/LUBNOR

- Peso Específico Real (Densidade Real) do CAP 50/70 = 1,030 kg/m³.

¹⁴ LUBNOR: refinaria da Petrobras situada na cidade de Fortaleza/Ceará.

4.2 AGREGADOS

4.2.1 Agregado reciclado de concreto

O agregado reciclado de concreto utilizado na pesquisa foi beneficiado e doado pela Usina de Reciclagem da Prefeitura Municipal de João Pessoa/Paraíba (Figura 4).

A coleta dos agregados reciclados de concreto (brita 25 e pedrisco 9,5) foi realizada em uma única oportunidade, recolhendo-se os granulares em sacos, diretamente das pilhas de estocagem, em quantidades suficientes para o desenvolvimento da pesquisa, de forma que todo o material utilizado nos experimentos tivesse a mesma procedência.

O processo de separação e classificação visual dos resíduos de concreto foi realizado pela Usina de Reciclagem da Prefeitura Municipal de João Pessoa/Paraíba. Houve o cuidado de evitar a presença de contaminantes (gesso, vidro, madeira, metal, plástico, papel, restos orgânicos e demais impurezas) que pudessem afetar a qualidade das misturas.



(a) Vista geral da usina de reciclagem da Prefeitura Municipal de João Pessoa/PB.



(b) Armazenagem do resíduo de concreto.



(c) Separação dos contaminantes.



(d) Produção do agregado reciclado de concreto.



(e) Vista geral da usina de reciclagem.

Figura 4 – Usina de reciclagem da Prefeitura Municipal de João Pessoa/PB (Fotos da autora, 2008).

Após passar pelo processo de seleção, beneficiamento e britagem, o resíduo foi classificado como ARC – agregado reciclado de concreto por possuir, no mínimo, 90% de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Antes da armazenagem e caracterização, os agregados reciclados passaram por uma lavagem (no laboratório de Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Pernambuco), objetivando a diminuição de pulverulentos e remoção de contaminação leve presente na amostra. Em seguida, os ARC foram levados à estufa por 24 horas, a temperatura de 110 °C, tempo suficiente para ser observada a constância da massa dos agregados.

4.2.2 Agregado natural

Os agregados naturais utilizados na pesquisa (brita 19, brita 16, brita 12 e pó de pedra) foram extraídos e produzidos pela Pedreira Líder, localizada no Engenho Recreio, Município de Jaboatão dos Guararapes/PE. Trata-se de uma brita granítica (rocha de origem plutônica, ácida, formada principalmente por feldspatos alcalinos e quartzo) em uso pelo DNIT, DER, INFRAERO, Prefeitura da cidade do Recife e outros.

A areia foi adquirida de jazida natural localizada na cidade do Conde/PB.

Os agregados naturais foram gentilmente doados pelas Usinas de Asfalto Andrade Guedes e Lidermac, ambas localizadas em Jaboatão dos Guararapes/PE.

4.2.3 Caracterização dos agregados

No dia da coleta na usina de reciclagem da Prefeitura Municipal de João Pessoa/PB, existiam duas opções de agregados reciclados de concreto. Visualmente aparentavam ser:

- brita 19 a 25;
- pedrisco.

Não foi obtido qualquer resultado de caracterização do material pela usina de reciclagem, apenas observou-se a triagem do material, as pilhas de estocagem e o processo de produção, e certificou-se de que se tratava de agregados oriundos de resíduos de concreto, foco do seu estudo. As duas opções disponíveis (brita e pedrisco), após a realização do ensaio de granulometria no Laboratório de Estruturas e Construção Civil da UFPE, foram caracterizadas como brita 25 e pedrisco (9,5 mm). Esta granulometria dos agregados reciclados de concreto é outro diferencial da sua pesquisa.

Tanto os agregados reciclados de concreto quanto os agregados naturais foram previamente analisados e caracterizados, sendo cuidadosamente armazenados em quantidade suficiente para que se utilizasse o mesmo material do início ao fim da pesquisa.

Os ensaios realizados nos agregados objetivaram verificar as propriedades geométricas, físico-químicas e mecânicas. A análise destas propriedades é necessária, pois os agregados que não possuem as características adequadas para uso em pavimentação contribuem para o surgimento de defeitos como, por exemplo, desagregação e deformação permanente. As

propriedades volumétricas e mecânicas das misturas Marshall também são fortemente influenciadas pelos agregados.

Os ensaios realizados nos agregados constam da Tabela 19 a seguir.

Tabela 19 – Ensaios de caracterização dos agregados utilizados na pesquisa.

Caracterização dos agregados	Método de Ensaio
Análise granulométrica	DNER-ME 083/98
Absorção e Densidade do agregado graúdo	DNER-ME 081/98
Densidade real do agregado miúdo	DNER-ME 084/95
Adesividade a ligante betuminoso do agregado graúdo	DNER-ME 078/94
Desgaste por abrasão <i>Los Angeles</i>	DNER-ME 035/98 e NBR-NM 51/2001
Índice de forma do agregado graúdo	DNER-ME 086/94
Durabilidade/Sanidade à solução de sulfato de sódio	DNER-ME 089/94
Módulo de finura	NBR 7211/2009
Equivalente de areia dos agregados miúdos	DNER-ME 054/97

A primeira consideração num projeto de mistura asfáltica é a graduação dos agregados. Por este motivo, o ensaio de granulometria (pelo método DNER-ME 083/98) foi o primeiro a ser realizado, tanto nas amostras de agregado natural, quanto nas amostras de agregado reciclado a serem utilizados nas misturas. Este ensaio é considerado um dos mais importantes por indicar as características físicas dos agregados, orientando qual tipo de mistura poderá ser realizada e em qual faixa do DNIT os agregados podem ser enquadrados.

Importantes propriedades das misturas asfálticas como: trabalhabilidade, estabilidade, rigidez, durabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, permeabilidade, resistência ao dano por umidade induzida, etc., recebem influência direta da distribuição granulométrica dos agregados da mistura. Os agregados tiveram sua composição granulométrica e teor de finos determinados através de peneiramento de acordo com o método DNER-ME 083/98. Com o ensaio, verificou-se que seria possível realizar misturas asfálticas do tipo CBUQ, dentro da faixa “B” do DNIT.

A tabela 20 apresenta a granulometria de todos os agregados utilizados nas cinco diferentes misturas estudadas.

Tabela 20 - Composição granulométrica dos agregados utilizados nas misturas, determinada conforme DNER-ME 083/98.

Abertura (mm)	Peneiras	Porcentagem passante						
		Brita 25 Reciclada	Brita 19 Natural	Brita 16 Natural	Brita 12 Natural	Pedrisco Reciclado	Pó de Pedra Natural	Areia Natural
25,4	1"	99,8%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
19,1	3/4"	66,9%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
12,7	1/2"	15,9%	43,6%	90,5%	99,4%	100,0%	100,0%	100,0%
9,5	3/8"	3,6%	20,7%	59,2%	90,8%	99,3%	100,0%	100,0%
4,8	Nº 4	1,2%	1,2%	7,1%	15,8%	27,5%	95,9%	100,0%
2,0	Nº 10	1,2%	0,5%	5,1%	4,7%	2,0%	63,8%	97,5%
0,42	Nº 40	1,1%	0,4%	2,0%	2,8%	1,5%	30,0%	58,9%
0,18	Nº 80	0,8%	0,0%	1,0%	2,0%	0,9%	16,4%	22,6%
0,075	Nº 200	0,7%	0,0%	0,5%	1,1%	0,8%	8,8%	6,3%

Foram adotadas as seguintes definições:

- dimensão máxima característica do agregado => abertura da peneira em que ficar retida, acumulada uma porcentagem de agregado igual ou imediatamente inferior a 5% em massa;
- módulo de finura do agregado => soma das porcentagens retidas acumuladas, em massa, de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100;
- materiais pulverulentos => partículas minerais com dimensão inferior a 0,075 mm, incluindo os materiais solúveis em água, presentes nos agregados.

Os resultados satisfatórios em todos os ensaios realizados nos agregados, conforme apresentados na Tabela 21, ajudaram a definir melhor o foco da pesquisa, a metodologia a ser adotada e os traços das misturas.

A princípio, também foram realizados ensaios de caracterização em agregados reciclados mistos. Os ARM foram descartados por possuir características inadequadas para uso em misturas asfálticas: baixa adesividade ao ligante betuminoso, elevada abrasão *Los Angeles*, excesso de grãos em formato lamelar, alta absorção (ainda maior que no ARC), etc.

Tabela 21 – Propriedades e resultados obtidos.

Propriedade	Resultado	Especificação	Método
Absorção de água (%) para a brita 25 reciclada	4,25%	—	DNER-ME 081/98
Absorção de água (%) para a brita 19 natural	0,58%	—	DNER-ME 081/98
Absorção de água (%) para a brita 16 natural	0,59%	—	DNER-ME 081/98
Absorção de água (%) para a brita 12 natural	0,88%	—	DNER-ME 081/98
Absorção de água (%) para o pedrisco reciclado	6,5%	—	DNER-ME 081/98
Densidade de massa real (kg/m ³) da brita 25 reciclada	2,346	—	DNER-ME 081/98
Densidade de massa real (kg/m ³) da brita 19 natural	2,780	—	DNER-ME 081/98
Densidade de massa real (kg/m ³) da brita 16 natural	2,737	—	DNER-ME 081/98
Densidade de massa real (kg/m ³) da brita 12 natural	2,700	—	DNER-ME 081/98
Densidade de massa real (kg/m ³) do pedrisco reciclado	2,214	—	DNER-ME 081/98
Densidade de massa real (kg/m ³) do pó de pedra	2,650	—	DNER-ME 084/95
Densidade de massa real (kg/m ³) da areia	2,630	—	DNER-ME 084/95
Adesividade da brita natural	Satisfatória	—	DNER-ME 078/94
Adesividade da brita reciclada	Satisfatória	—	DNER-ME 078/94
Abrasão Los Angeles da brita natural (%)	25%	máx. 50%	(NBR-NM 51/2001)
Abrasão Los Angeles (%) do pedrisco reciclado (com dimensão máxima característica 9,5 mm)	45,65%	máx. 50%	(NBR-NM 51/2001)
Abrasão Los Angeles (%) da brita 25 reciclada (com dimensão máxima característica 25 mm)	43,40%	máx. 50%	(NBR-NM 51/2001)
Índice de forma da brita natural	0,5	—	(DNER-ME 086/94)
Índice de forma da brita 25 reciclada	0,75	—	(DNER-ME 086/94)
Durabilidade (solução sulfato de sódio)/Sanidade	2,0%	máx. 12%	(DNER-ME 089/94)
Módulo de Finura do pedrisco reciclado	5,89	—	NBR 7211/2009
Módulo de Finura da brita 25 reciclada	7,29	—	NBR 7211/2009
Equivalente de areia do pó de pedra	70%	mín. 55%	(DNER-ME 054/97)
Equivalente de areia da areia	81,3%	mín. 55%	(DNER-ME 054/97)

A caracterização dos agregados ocorreu no Laboratório de Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Pernambuco e no Laboratório da Usina Andrade Guedes, em Jaboatão dos Guararapes/PE (Figura 5).



(a) Densidade



(b) Absorção



(c) Índice de forma



(d) Adesividade

Figura 5 – Fotos dos ensaios de densidade, absorção, índice de forma e adesividade realizados no Laboratório de Pavimentação da UFPE (Fotos da autora, 2008).

O ensaio de abrasão *Los Angeles* (Figura 6) foi realizado conforme a NBR NM 51/2001. Pelos critérios normativos da NBR NM 51/2001, o percentual de desgaste por abrasão *Los Angeles* deve ser $\leq 50\%$.

O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem em peso do material que após o ensaio passa pela peneira de malhas quadradas de 1,7 mm (peneira ABNT n° 12).



(a) Separação das amostras de agregados



(b) Agregados com as esferas abrasivas

(c) Equipamento *Los Angeles*

(d) Limpeza das esferas após realização do ensaio



(e) Peneiramento



(f) Separação dos grãos após abrasão



(g) Lavagem do material retido

Figura 6 – Sequência do ensaio de desgaste por abrasão *Los Angeles*.

A abrasão “*Los Angeles*” do agregado é calculada pela fórmula:

Equação 1

$$A_n = [(m_n - m'_n)/m_n] \times 100$$

Onde:

A_n = abrasão “*Los Angeles*” da graduação n com aproximação de 1%;

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n = massa da amostra lavada e seca após o ensaio.

Após a realização dos ensaios de caracterização e determinação dos traços experimentais, os agregados foram devidamente homogeneizados e o tamanho da amostra reduzida com o uso do redutor Jones (Figura 7), para a preparação das misturas.



(a) Redução da amostra de agregado



(b) Separação dos agregados para as misturas

Figura 7 – Laboratório da Usina de Asfalto Andrade Guedes localizada no município de Jaboatão dos Guararapes/PE (Fotos da autora, 2009).

4.3 CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE

Para a confecção das misturas híbridas¹⁵, foram utilizados os agregados reciclados e lavados de concreto (ARC)¹⁶, em substituição parcial ou total ao agregado graúdo natural.

Optou-se apenas pelo agregado graúdo reciclado de concreto descartando-se o agregado graúdo reciclado misto (ARM), que não obedeceu aos critérios de satisfação (índice de forma, resistência ao desgaste por abrasão *Los Angeles*, adesividade, etc.) para uso em misturas asfálticas.

Após realização dos principais ensaios de caracterização no ARC utilizado nesta pesquisa, foram observadas algumas diferenças com relação à porosidade, absorção, abrasão *Los Angeles* e densidade, quando comparado ao agregado natural. No entanto, apesar das diferenças, estes agregados obedeceram às mesmas condições estabelecidas para o agregado graúdo natural utilizado em concretos betuminosos convencionais:

- fragmentos duráveis, de superfície rugosa e de forma angular;
- inexistência de torrões de argila e matéria orgânica;
- formato cúbico, com pouquíssima quantidade de pedras lamelares (alongadas)¹⁷;
- inalterabilidade da granulometria após a compactação da mistura, respeitando os limites da faixa granulométrica na qual o CBUQ foi dosado;
- abrasão *Los Angeles* inferior a 50%, em conformidade com a NBR NM 51/2001;
- boa adesividade ao ligante asfáltico utilizado, em conformidade com a DNER-ME 078/94.

Por se tratar de um material que, segundo revisão bibliográfica realizada pela autora, tem sido pouco estudado em misturas asfálticas, o conhecimento acerca do comportamento do CBUQ contendo ARC é limitado.

¹⁵ Misturas híbridas: concreto betuminoso usinado a quente dosado com agregados naturais e agregados reciclados de concreto.

¹⁶ ARC: assim denominados por possuir no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento *Portland* e rochas na sua fração graúda.

¹⁷ O excesso de pedras lamelares alongadas foi uma característica observada no ARM e prejudica bastante a trabalhabilidade e a resistência mecânica das misturas asfálticas.

Conforme citado anteriormente, o agregado reciclado de concreto passou por uma lavagem no Laboratório de Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Pernambuco, o que diminuiu a quantidade de pulverulentos e, conseqüentemente, aumentou a adesividade ao ligante betuminoso.

Para verificação da viabilidade técnica, antes das misturas apresentadas neste trabalho, a autora realizou algumas misturas de teste, com a adição dos agregados reciclados de concreto, seguindo todos os padrões estabelecidos pelas normas DNER-ME 043/95 e DNIT 031/2006 – ES. Ficou comprovado que, com exceção da lavagem e secagem em estufa do ARC, todo o processo de produção e ensaio é exatamente igual aos das misturas convencionais, dosadas através da metodologia Marshall. Ao comprovar a semelhança entre as misturas híbridas e a mistura de referência, foram definidos os traços das misturas desta pesquisa, respeitando-se os limites da faixa B do DNIT.

Após a realização e a avaliação de algumas misturas de teste, que não estão apresentadas neste trabalho, foram definidos os cinco traços experimentais a seguir:

- Traço 1 (T_{0%}): com 0% de agregado graúdo reciclado (mistura padrão, de referência);
- Traço 2 (T_{25%}): com 25% de agregado graúdo reciclado;
- Traço 3 (T_{50%}): com 50% de agregado graúdo reciclado;
- Traço 4 (T_{75%}): com 75% de agregado graúdo reciclado;
- Traço 5 (T_{100%}): com 100% de agregado graúdo reciclado.

Conforme citado anteriormente, na revisão bibliográfica (Capítulo 2 desta dissertação), as atividades de normalização de agregados reciclados de construção civil no Brasil são recentes. Existem poucas normas referentes ao uso destes agregados:

- NBR 15.115 – “Agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos”; e
- NBR 15.116 – “Agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural”.

Ainda não foram lançadas normas para o aproveitamento do ARC em misturas asfálticas.

Um dos critérios de avaliação do comportamento mecânico dos agregados reciclados é o ensaio de ISC (Índice de Suporte Califórnia), constante na norma NBR 15.115/2004.

Na presente pesquisa os ensaios de ISC e de MR¹⁸ não foram realizados, pois os agregados estão sendo estudados para uso na mistura do tipo CBUQ, para camadas de ligação (*binder*) ou de rolamento.

4.3.1 Dosagem Marshall

Para a confecção das misturas, todos os materiais empregados nesta pesquisa atenderam às normas vigentes do DNIT.

As dosagens e os ensaios volumétricos e de estabilidade (E) e fluência (F) foram realizados nos laboratórios das Usinas de Asfalto Andrade Guedes e Lidermac.

As cinco misturas estudadas, incluindo a mistura de referência, foram dosadas com quatro teores de ligante (4,5%, 5%, 5,5% e 6%) cada. O teor “ótimo” de projeto foi determinado através do Vv% e da RBV%. As quatro misturas híbridas tiveram a substituição de 25%, 50%, 75% e 100% do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado lavado de concreto (brita 25 e pedrisco 9,5). Em todas as misturas, utilizou-se 100% de agregado miúdo natural. O cálculo dos cinco traços de CBUQ seguiu as recomendações de controle qualitativo, conforme as especificações contidas na norma DNIT – 031/2006 – ES (Tabela 22) e ME 043/95.

Tabela 22 – Faixas granulométricas do concreto asfáltico - Norma DNIT 31/2006 - ES (DNIT, 2006).

Peneira de malha quadrada		% em massa, passante			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 – 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 – 100	95 – 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 – 90	80 – 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 – 100	± 7%
3/8"	9,5	35 – 65	45 – 80	70 – 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 – 50	28 – 60	44 – 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 – 40	20 – 45	22 – 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 – 30	10 – 32	8 – 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 – 20	8 – 20	4 – 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 – 8	3 – 8	2 – 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS ₂₍₊₎ (%)		4,0 – 7,0 Camada de ligação (<i>Binder</i>)	4,5 – 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 – 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

¹⁸ O ensaio de módulo de resiliência (MR) foi realizado na etapa de caracterização mecânica das misturas.

Para a preparação das misturas, as amostras de todos os materiais foram previamente pesadas e preparadas, conforme recomendações das Normas (DNIT 031/2006 e ME 043/95).

Após o aquecimento do ligante (CAP 50/70) em estufa, a 155-160°C (temperatura definida em função do gráfico da Viscosidade *Saybolt-Furol*), e dos agregados a 165-170°C¹⁹, o processo de mistura dos agregados com o ligante foi realizado manualmente, ao fogo. A temperatura foi cuidadosamente mantida entre 165°C e 170°C, até a total cobertura dos agregados pelo ligante (Figura 8).

A compactação manual foi realizada entre 140°C e 145°C, com 75 golpes em cada face dos corpos de prova (Figura 8e e 8f). Após a compactação dos corpos de prova, os mesmos permaneceram nos moldes por, no mínimo, 24 horas até que atingissem a temperatura ambiente. Em seguida, foram desmoldados (Figura 8g) para a realização do ensaio que determina a estabilidade Marshall e a fluência.

É importantíssimo manter as temperaturas do ligante, dos agregados, da mistura e da compactação sob controle, pois, qualquer alteração nas temperaturas durante as etapas de produção do CBUQ interfere sensivelmente nos resultados dos ensaios.



(a) Adição do ligante aos agregados



(b) Mistura ao fogo

¹⁹ A temperatura dos agregados deve ficar acima da do ligante de 10 a 15°C.



(c) Agregados totalmente envolvidos pelo ligante



(d) Controle de temperatura da mistura



(e) Colocação de 1.200g da mistura no molde



(f) Compactação manual a 145°C, 75 golpes/face



(g) Desmoldagem do corpo de prova

Figura 8 – Sequência de preparação das misturas pelo Método Marshall/Laboratório da Usina de Asfalto Andrade Guedes localizada no município de Jaboatão dos Guararapes/PE (Fotos da autora, 2009).

Faz-se necessária a identificação, numeração (Figura 9a) e medição (Figura 9b) de todos os corpos de prova, no momento da desmoldagem, para a realização dos ensaios de controle qualitativo do concreto asfáltico.



(a) Identificação dos corpos de prova



(b) Medição dos corpos de prova

Figura 9 – Identificação e medição dos corpos de prova (Fotos da autora, 2009).

As grandezas que interferem na dosagem (determinação do teor de projeto), com base nas exigências do método de Bruce Marshall, são obtidas através da realização dos seguintes ensaios:

- Peso do corpo de prova ao ar.
- Peso do mesmo corpo de prova imerso em água, com a ajuda de uma balança hidrostática (Figura 10).

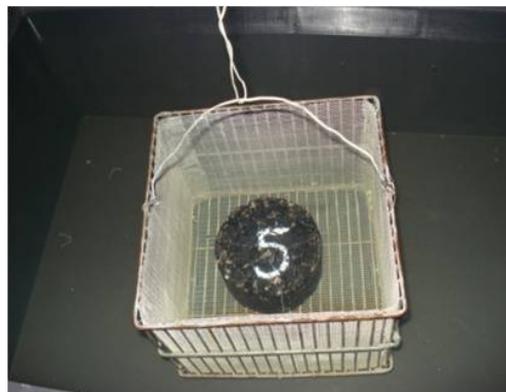


Figura 10 - Determinação do volume e densidade (Fotos da autora, 2009).

- Volume: é a diferença entre o peso ao ar e o peso imerso (Figura 10).

Equação 2 – Volume.

$$\text{Vol} = \text{peso ao ar} - \text{peso imerso}$$

- Densidade aparente: é o peso ao ar dividido pelo volume.

Equação 3 – Densidade aparente.

$$\text{Densidade aparente} = \text{peso ao ar} / \text{volume}$$

- Densidade real (teórica): é a densidade média teórica de projeto (DMT), varia de acordo com o traço da mistura. Com as massas específicas reais (densidade real) de todos os materiais e suas respectivas proporções, faz-se uma ponderação para a determinação da DMT da mistura, para os diferentes percentuais de ligante. A Equação 4 a seguir exemplifica como calcular a DMT:

Equação 4 – Determinação da densidade real média ou densidade média teórica (DMT) através da ponderação das massas específicas reais.

$$\text{DMT} = 100 / [(\% \text{ lig} / D_{\text{lig}}) + (\% b_{25} / D_{b_{25}}) + (\% b_{19} / D_{b_{19}}) + (\% b_{16} / D_{b_{16}}) + \dots + (\% \text{ areia} / D_{\text{areia}})]$$

Onde:

$\% \text{ lig}$ = porcentagem de ligante, expressa em relação à massa total da mistura;

$\% b_{25}$, $\% b_{19}$, $\% b_{16}$, $\% b_{12}$, $\% \text{ pedrisco}$, $\% \text{ pó de pedra}$, $\% \text{ areia}$ = porcentagem de cada um dos agregados utilizados na mistura, expressas em relação à massa total da mistura asfáltica;

D_{lig} , $D_{b_{25}}$, $D_{b_{19}}$, $D_{b_{16}}$, $D_{b_{12}}$, D_{pedrisco} , $D_{\text{pó de pedra}}$, D_{areia} = massas específicas reais (densidades reais) do ligante e de cada um dos agregados utilizados na mistura.

- Volume de vazios ($V_v\%$): é a relação entre a densidade real subtraída da densidade aparente, dividida pela densidade real e multiplicada por cem. Procurou-se manter o valor mais próximo possível da mistura padrão (com 100% de agregados naturais). De acordo com a norma (DNIT 031/2006 - ES), o $V_v\%$ deve variar entre 3% e 5% para camada de rolamento e entre 4% e 6% para camada de ligação (*binder*).

Equação 5 - Volume de vazios %.

$$V_v\% = [(densidade\ real - densidade\ aparente)/densidade\ real] \times 100$$

- Vazios cheios de betume% (V.C.B. %): é a multiplicação da densidade aparente pelo percentual de betume, dividida pela densidade do ligante. Buscou-se o valor mais próximo possível da mistura padrão (com 100% de agregados naturais).

Equação 6 - % de vazios cheios de betume.

$$VCB\% = (densidade\ aparente \times \% \text{ teor de betume})/densidade\ do\ ligante$$

- Vazios do agregado mineral% (V.A.M. %): é a soma do volume de vazios ($V_v\%$) com os V.C.B.%. De acordo com a norma (DNIT 031/2006 - ES), é função do tamanho nominal máximo do agregado utilizado.

Equação 7 – Porcentagem de vazios do agregado mineral.

$$VAM\% = \%VCB + \%vazios$$

- Relação betume/vazios (RBV%): é a relação entre V.C.B. % e V.A.M. % multiplicada por 100. De acordo com a norma (DNIT 031/2006 - ES), deve ficar entre 75% e 82% para camada de rolamento e entre 65% e 72% para camada de ligação (*binder*).

Equação 8 – Relação betume/vazios.

$$RBV\% = (VCB\%/VAM\%) \times 100$$

- Para a realização do ensaio de estabilidade e fluência, deve-se anotar a leitura no defletômetro deve ser anotada no momento da realização do ensaio.
- Estabilidade encontrada é obtida no momento do rompimento do corpo de prova.
- Fator de correção deverá ser obtido em tabela, varia conforme as medidas do corpo de prova.
- Estabilidade corrigida é a multiplicação da estabilidade encontrada pelo fator de correção. A estabilidade mínima, em kgf, com 75 golpes por face, conforme DNER – ME 043/95 deverá ser 500 kgf. Todas as misturas estudadas obedeceram a este parâmetro.
- Fluência (1/100) é obtida no medidor de fluência, em mm.

Para a realização do ensaio de estabilidade e fluência, os corpos de prova devem ser colocados em banho-maria a 60°C, por 30 minutos (Figuras 11a e 11b). Ao retirar os corpos de prova do banho-maria, o ensaio deverá ser executado na Prensa Marshall (Figura 11c) em, no máximo, 30 segundos.



(a) Corpos de prova em banho-maria a 60°C



(b) Retirada dos cps após 30 min em banho-maria



(c) Determinação da Estabilidade e Fluência

Figura 11 – Controle qualitativo do CBUQ/Laboratório da Usina de Asfalto Lidermac município de Jaboatão dos Guararapes/PE (Fotos da autora, 2009).

O conhecimento das propriedades volumétricas, determinadas através da metodologia de dosagem, sugere qual será o desempenho de uma mistura em campo. Através destas variáveis de mistura, que dependem da origem e da graduação dos agregados, do ligante e do volume de vazios, do controle nas temperaturas dos materiais, da mistura e da compactação, pode-se verificar a influência de cada um desses componentes nas propriedades da mistura.

Com os valores dos parâmetros volumétricos e mecânicos (de estabilidade e fluência), são geradas seis curvas em função do teor de asfalto. Estes gráficos que ajudam a definir o teor de projeto (chamado teor “ótimo” de ligante).

As misturas devem seguir as especificações contidas nas Tabelas 23 e 24 a seguir:

Tabela 23 – Norma DNIT 031/2006 – ES.

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento	Camada de ligação (Binder)
Porcentagem de vazios %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação Betume/vazios %	DNER-ME 043	75 a 82	65 a 72
Estabilidade mínima (kgf) para 75 golpes	DNER-ME 043	500	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima, em MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65

Tabela 24 - Norma DNIT 031/2006 – ES.

VAM – Vazios do Agregado Mineral		
Tamanho Nominal Máximo do agregado		VAM mínimo %
#	mm	
1 ½”	38,1	13
1”	25,4	14
¾”	19,1	15
½”	12,7	16
3/8”	9,5	18

Após a realização dos ensaios e obtenção de resultados satisfatórios nos parâmetros volumétricos da metodologia Marshall, para confirmação do teor “ótimo” e granulometria da mistura, realiza-se o ensaio de extração do betume, pelo método de ensaio DNER-ME 053/94.

O corpo de prova é levado à estufa, a 100°C - 120°C, por aproximadamente uma hora, para amolecer e facilitar a extração do ligante pelo solvente. Esta extração pode ser realizada com xilol ou tetracloreto de carbono, porém, por ser um material muito tóxico, nesta pesquisa deu-se preferência ao uso da gasolina (Figura 12). São realizadas quantas lavagens forem necessárias, adicionando-se 150 ml de solvente por vez, até que o solvente esteja saindo claro, livre da presença de betume.

Após a extração do betume, a mistura passou por secagem em estufa a 80°C - 100°C, até a constância do peso (Figura 12f). O agregado assim recuperado, seco, é pesado. O peso da amostra antes do ensaio subtraído deste peso do agregado seco, sem betume, indica o peso do betume extraído. A porcentagem de betume é a relação entre o peso do betume extraído e o peso da amostra total, multiplicada por 100.

Em seguida, os agregados passaram por nova análise granulométrica para verificar se, mesmo após a compactação, quando ocorrem quebras de alguns grãos, a mistura permaneceu dentro da faixa granulométrica especificada. Nesta pesquisa, a faixa B do DNIT. Verificou-se que os limites da faixa B foram mantidos.



(a) e (b) Colocação da gasolina para extração do betume no Rotarex (equipamento utilizado na extração do betume)



(c) e (d) Foram realizadas entre 6 e 7 lavagens, com gasolina, para a extração total do betume da mistura



(e) e (f) O material, livre do ligante, é levado para secagem em estufa a 100°C, até a constância do peso

Figura 12 – Sequência do ensaio de Extração do Betume pelo método DNER-ME 053/94/Laboratório da Usina de Asfalto Lidermac no município de Jaboatão dos Guararapes/PE (Fotos da autora, 2009).

Para a realização dos ensaios previstos para o controle qualitativo do CBUQ, conforme as especificações DNIT – ES 031/2006 e DNER- ME 043/95 e também para realização dos ensaios de estabilidade e fluência, foram moldados 6 corpos de prova para cada um dos 4 teores de ligante (4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%) e para cada uma das 5 misturas estudadas, o que gerou 120 corpos de prova. Após a realização destes ensaios e com o teor ótimo de ligante definido: 5,0% (para a mistura de referência e as para as demais misturas com 25%, 50%, 75% e 100% de agregado graúdo reciclado), para execução dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração por compressão diametral estática (RT), foram produzidos mais 3 corpos de prova, no teor de projeto de cada uma das cinco misturas, totalizando mais 15 corpos de prova.

Por fim, para a realização dos ensaios de fadiga à tensão controlada de 20%, 30%, 40% e 50% do valor da RT, foram moldados mais 12 corpos de prova para cada uma das 5 misturas estudadas (mais 60 corpos de prova).

Em função de alguns erros e fatores difíceis de controlar na maioria dos experimentos laboratoriais como, por exemplo: falhas nos equipamentos ou operadores, diferenças na umidade relativa, temperatura e tempo de execução, acomodação dos cps, etc., alguns traços foram repetidos, a fim de que fossem descartados os resultados discrepantes.

Ao final dos experimentos, excluindo-se as misturas de teste iniciais e as falhas ocorridas durante a realização das misturas e ensaios, foram aproveitados os resultados dos ensaios realizados em 195 corpos de prova.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Por fim, foram realizados os ensaios complementares para verificação das propriedades mecânicas: resistência à tração estática por compressão diametral (DNER-ME 138/94), módulo de resiliência por compressão diametral (DNER-ME 133/94) e vida de fadiga a tensões controladas.

Os ensaios complementares de caracterização mecânica foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

4.4.1 Resistência à Tração estática por compressão diametral (DNER-ME 138/94)

A resistência à tração tem sido considerada um dos mais importantes parâmetros de avaliação de materiais como: misturas asfálticas e concretos. Pelo método de ensaio DNER-ME 138/94, o valor mínimo considerado satisfatório para misturas asfálticas deve ser 0,65 MPa aos 25°C.

Para a execução do ensaio, foram utilizados três corpos de prova para cada um dos teores ótimos das cinco misturas avaliadas. Os mesmos foram medidos (altura e diâmetro), colocados em uma câmara com temperatura controlada, onde permaneceram por, no mínimo, duas horas, até a estabilização da temperatura em 25°C.

Em seguida, o corpo de prova é colocado na prensa Marshall, apoiado entre um friso metálico curvo inferior e outro superior, colocados diametralmente (Figura 13a). A carga é aplicada verticalmente no sentido diametral do corpo de prova, a uma velocidade de 0,8 mm/s (Figura 13b), até a sua ruptura (Figura 13c). Anota-se o valor da carga (F) no momento do rompimento. Encontra-se o valor da RT através da Equação 9.

Equação 9 – Resistência à tração.

$$RT = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot h}$$

Onde:

RT = resistência à tração por compressão diametral, em kgf/cm²;

F = carga aplicada no momento da ruptura, em kgf;

D = diâmetro do corpo de prova, em cm;

h = altura média do corpo de prova, em cm.



(a) Colocação do corpo de prova no dispositivo centralizador, na prensa, para realização do ensaio.



(b) Momento de aplicação da carga.



(c) Corpo de prova após o rompimento.

Figura 13 – Realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, conforme DNER-ME 138/94, no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC (Fotos da autora, 2009).

Na figura 14 há uma exemplificação do estado de tensões ao qual o corpo de prova é submetido.

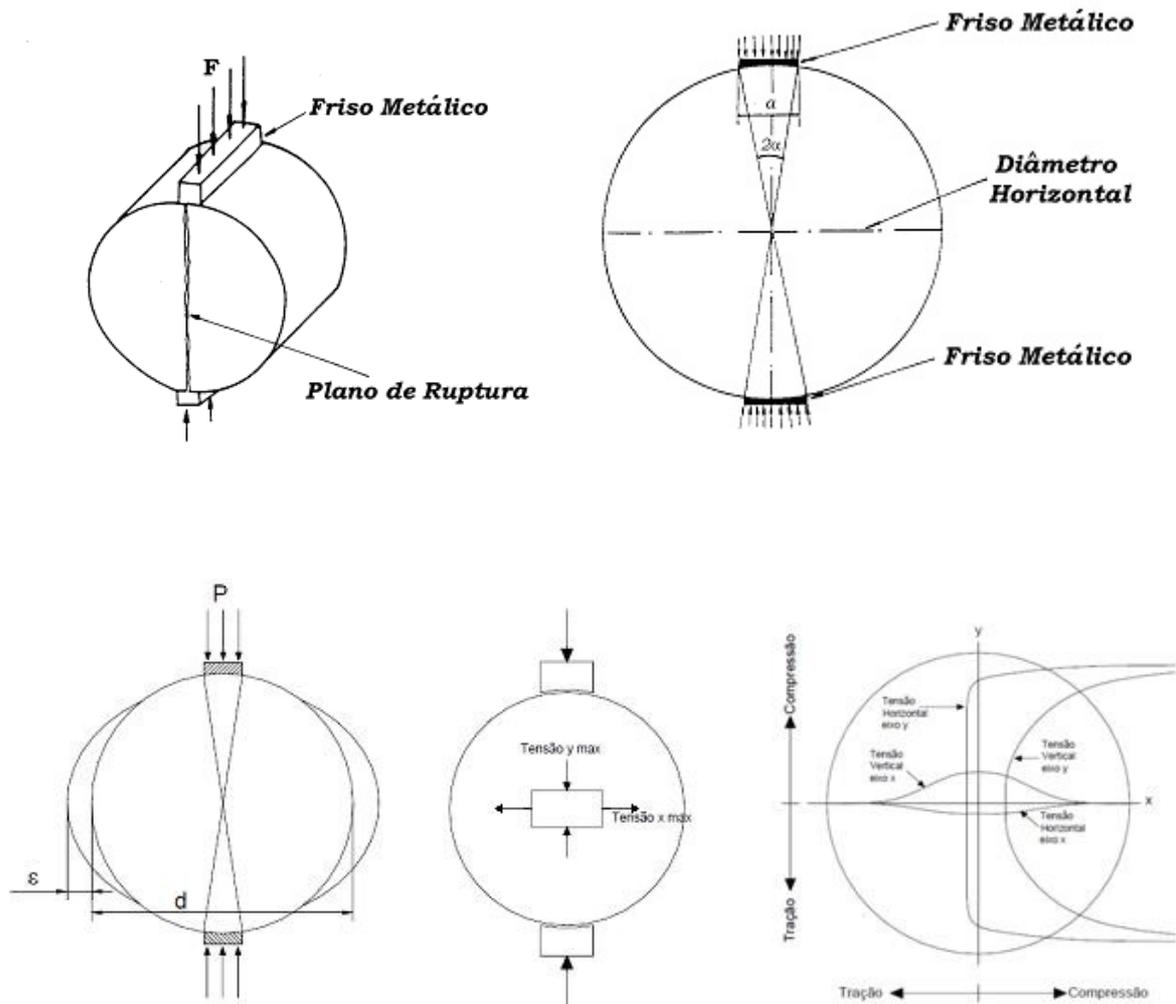


Figura 14 – Estado de tensões geradas no ensaio de RTCD (Fonte: Specht, 2004).

4.4.2 Módulo de Resiliência por compressão diametral dinâmica (DNER-ME 133/94)

Define-se módulo de resiliência (MR) como sendo a relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente e a deformação a uma determinada temperatura.

No Brasil, utilizam-se os resultados dos ensaios de MR para o cálculo de tensões e deformações nos pavimentos. Estes valores são importantes no dimensionamento dos mesmos.

No caso da presente pesquisa, para cada uma das cinco misturas, foram separados três corpos de prova (com o teor de projeto) para a realização do ensaio, em conformidade com as recomendações da norma DNER-ME 133/94. As amostras foram colocadas na câmara do equipamento pneumático, com uma antecedência mínima de duas horas, para que os corpos de prova atingissem a temperatura constante na qual o ensaio foi realizado (25°C). Após este período, cada um dos corpos de prova cilíndricos é medido e colocado na posição de ensaio, na base da prensa, com o apoio do friso metálico. Realizaram-se os ajustes nos LVDTs (*linear variable differential transformers*), que serão responsáveis por registrar e transmitir os dados a um computador acoplado ao equipamento pneumático, onde os resultados foram salvos através da identificação prévia de cada um dos corpos de prova.

O pistão de aplicação da carga foi ajustado ao corpo de prova com a ajuda do friso metálico superior e posicionado diametralmente conforme o friso inferior.

A Figura 15 mostra uma ilustração do equipamento utilizado para o ensaio.

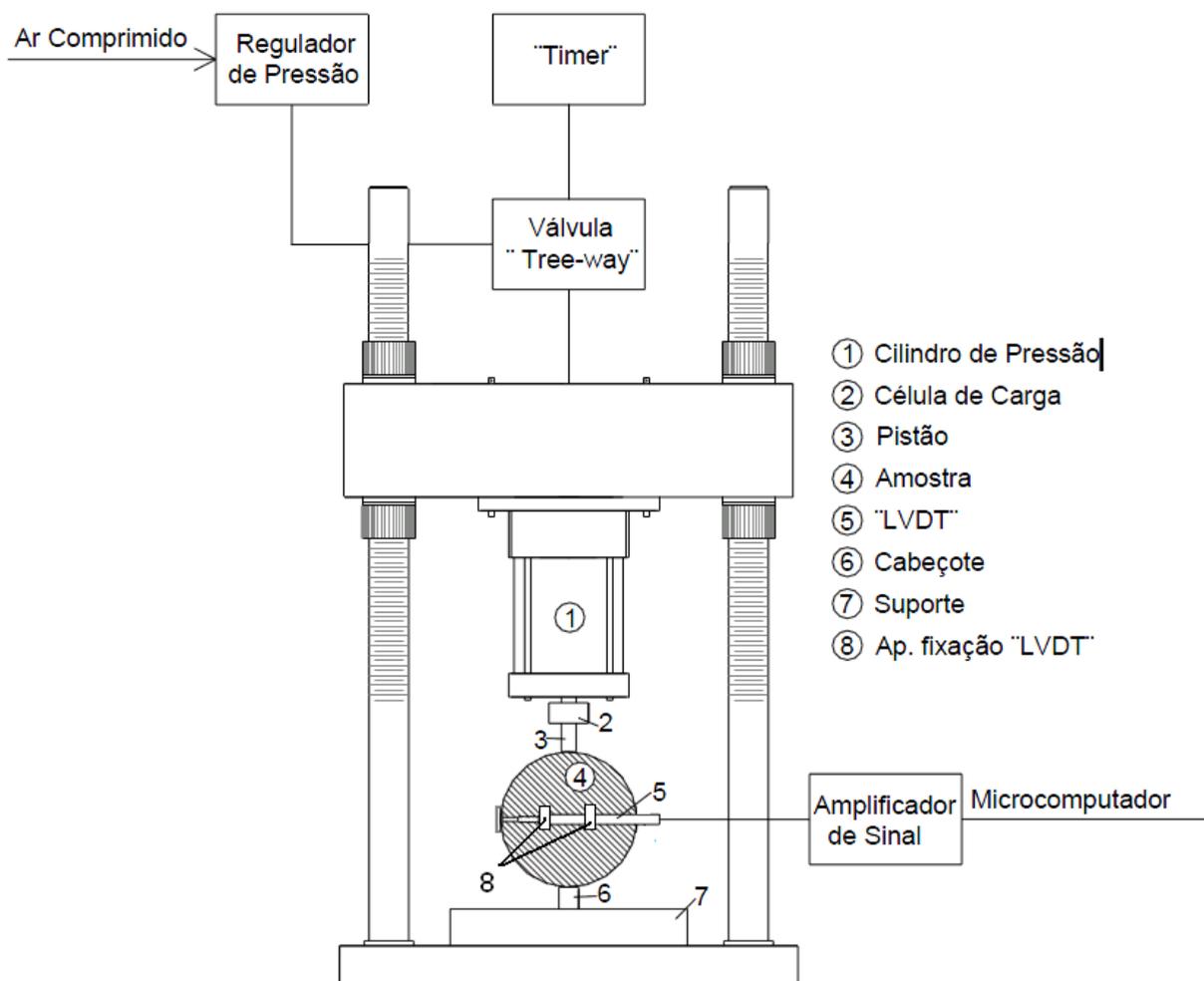


Figura 15 – Equipamento para realização do ensaio de módulo de resiliência.

Para a temperatura de realização do ensaio (25°C), o coeficiente de Poisson (μ) utilizado foi fixado em 0,30. Ao iniciar o ensaio, aplica-se um carregamento vertical pulsante no plano diametral, por 200 vezes, com tempo de 0,1s e 0,9s de repouso, equivalente a uma tensão (σ) menor ou igual a 30% da resistência à tração por compressão diametral. A frequência de aplicação da carga é de 60 ciclos por minuto, para simular o efeito do carregamento dinâmico provocado pelos pneumáticos dos veículos, durante o tráfego. Faz-se isto para o pré-condicionamento do corpo de prova. Em seguida, aplica-se a carga vertical 300, 400 e 500 vezes. Os deslocamentos máximos são registrados após 300, 400 e 500 repetições (Figura 16d). Repete-se o mesmo procedimento para cada conjunto de três corpos de prova.

Com os valores da carga aplicada e dos deslocamentos horizontais recuperáveis registrados, calcula-se o MR através da Equação 10. O módulo de resiliência (MR) para cada mistura ensaiada será a média aritmética dos valores obtidos para os três corpos de prova.

Equação 10 – Módulo de resiliência.

$MR = P/\Delta h \times (0,9976\mu + 0,2692)$	ou	$MR = \sigma_d/\varepsilon_r$
-----------------------------------------------	----	-------------------------------

Onde:

MR = módulo de resiliência, em kgf/cm²;

P = carga aplicada verticalmente e repetidamente no corpo de prova, em kgf;

Δh = deslocamento elástico resiliente registrado para 300, 400 e 500 repetições da carga P, em mm;

μ = coeficiente de Poisson, para o ensaio realizada a 25°C, adota-se $\mu = 0,30$.

Ou

MR = módulo de resiliência, em MPa;

σ_d = tensão desvio aplicada, $\sigma_d = \sigma_3 - \sigma_1$, em MPa;

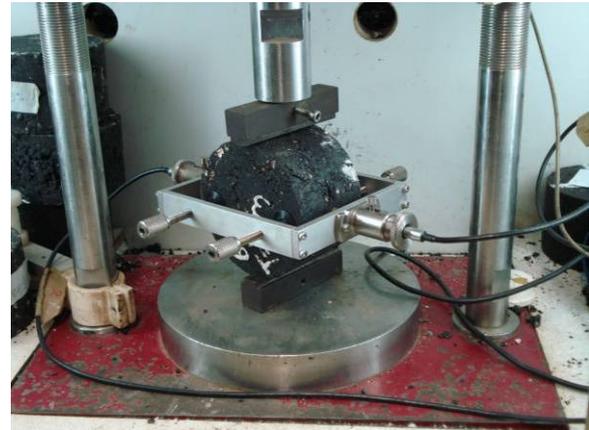
σ_3 = tensão de confinamento aplicada, em MPa;

σ_1 = tensão axial aplicada, em MPa;

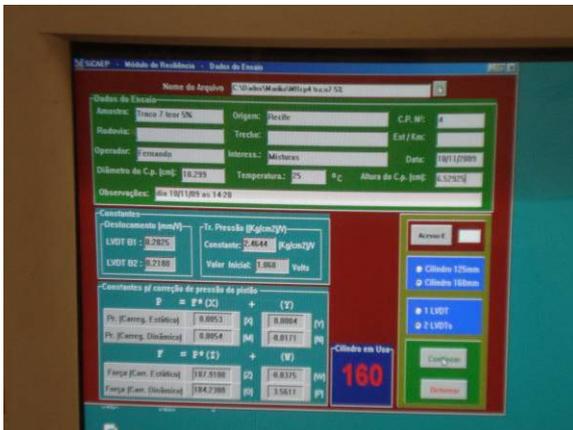
ε_r = deformação axial resiliente específica, em mm/mm.



(a) Posicionamento do corpo de prova.



(b) Ajuste dos LVDTs na base da prensa.



(c) Inserção dos dados para iniciar o ensaio.



(d) Transmissão e registro dos dados.

Figura 16 – Ensaio de Módulo de Resiliência realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC (Fotos da autora, 2009).

4.4.3 Fadiga por compressão diametral a tensões controladas de 20%, 30%, 40% e 50% do valor da RT

A ASTM (1979) definiu o fenômeno da fadiga como: “processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material, sujeito a tensões de amplitudes variáveis, que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos”. A fadiga do material é um indicativo de que os danos vão aumentando à medida que os ciclos vão sendo aplicados.

O ensaio de vida de fadiga apresenta alguns procedimentos semelhantes ao ensaio de módulo de resiliência, como a aplicação de cargas cíclicas, a tensões controladas, que produzirão danos no material, de forma que, no momento da aplicação da carga, o dano cresce e, no

descarregamento, o dano mantém-se constante. Dessa forma, contrariamente ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral estática, nestes ensaios em que são aplicadas cargas cíclicas (repetidamente), o rompimento do corpo de prova ocorrerá em níveis de tensão bem abaixo daquele aplicado nos ensaios estáticos. Porém, as repetições de carga também foram realizadas por compressão diametral. Estes ensaios de cargas repetidas e compressão diametral geram um estado biaxial de tensão no corpo de prova cilíndrico da mistura Marshall. Durante o ensaio de fadiga, a deformação por tração vai aumentando até o rompimento da amostra em seu plano diametral.

O ensaio de fadiga ainda não está normalizado no Brasil. Porém, em função da facilidade, é bastante comum sua realização, geralmente à tensão controlada (conforme realizado na presente pesquisa). O equipamento utilizado é o mesmo para realização do ensaio de módulo de resiliência. A temperatura também é a mesma para ambos os ensaios, 25°C. A frequência de aplicação de carga segue o parâmetro de 60 aplicações por minuto, sendo de 0,10 segundo a duração do carregamento repetido e descanso de 0,9 segundo.

A dosagem das misturas ocorreu na Usina de Asfalto Lidermac, em Jaboatão dos Guararapes/Pernambuco. Os ensaios mecânicos foram realizados no LMP/UFC, em Fortaleza/Ceará. Os corpos de prova permaneceram reservados à temperatura ambiente por 6 meses até serem levados para a realização dos ensaios de MR e RT na UFC. Alguns fatores como: o calor durante a viagem, as condições de transporte e o armazenamento, além da elevada absorção dos agregados reciclados, podem ter interferido para a perda dos componentes oleosos e voláteis do ligante, aumentando e acelerando o envelhecimento e a rigidez das misturas. Para realização dos ensaios de fadiga, a dosagem também ocorreu na mesma usina de asfalto, porém, num período de apenas uma semana os cps foram levados para o LMP/UFC e ensaiados. Não foram realizados ensaios de envelhecimento nas misturas. Portanto, é impossível avaliar o grau de interferência destes fatores nos resultados obtidos nos ensaios de RT, MR e vida de fadiga.

O ensaio de fadiga não foi realizado na mistura 5, com 100% de agregado graúdo reciclado, devido aos resultados insatisfatórios com relação aos parâmetros volumétricos definidos na metodologia Marshall, que impossibilitaram a obtenção do teor de projeto.

Analisou-se a fadiga a 25°C, para quatro níveis de tensão (20%, 30%, 40% e 50% da RT) em cada mistura estudada. Foram necessários sessenta corpos de prova, sendo doze por mistura, divididos em três para cada nível de tensão. A montagem dos corpos de prova no

equipamento pneumático (Figura 17) ocorreu de forma idêntica ao ensaio de módulo de resiliência.

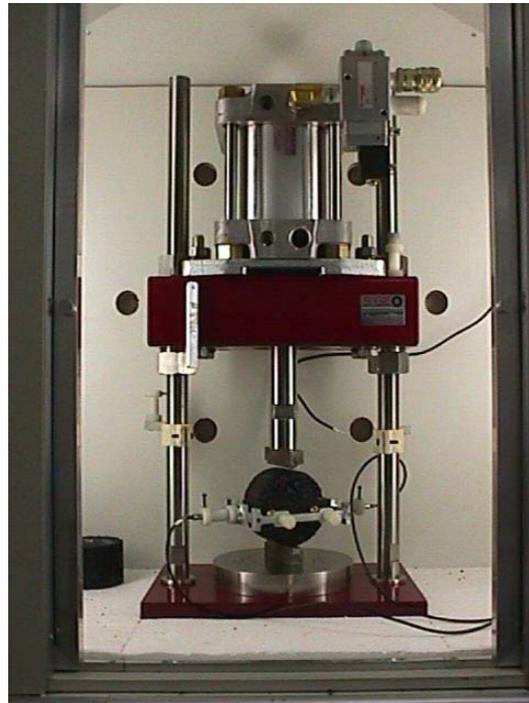


Figura 17 – Equipamento pneumático utilizado para os ensaios de fadiga e de módulo de resiliência.

Os resultados obtidos da relação entre o número de repetições até a ruptura da amostra e o nível de tensões atuantes (diferenças de tensões verticais de compressão e horizontais de tração, no centro dos corpos de prova - $\Delta\sigma$), são lançados em planilha MS-Excel para geração do gráfico número de golpes *versus* diferença de tensões, gerando linhas de tendência.

Equação 11 – Vida de fadiga à tensão controlada.

$N = k_1(1/\Delta\sigma)^{n_1}$	ou	$N = k_1(1/\sigma_t)^{n_1}$
---------------------------------	----	-----------------------------

Onde:

N = número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

$\Delta\sigma$ = diferença algébrica entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro do corpo de prova cilíndrico;

σ_t = tensão de tração repetida solicitante;

k_1 e n_1 = constantes obtidas da regressão linear dos pares N e σ_t ou N e $\Delta\sigma$, determinados nos ensaios, em escala logarítmica.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos em laboratório na caracterização dos agregados naturais e reciclados de concreto e das misturas asfálticas (de referência e híbridas), do tipo CBUQ, produzidas no decorrer do programa experimental.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A Tabela 25 a seguir apresenta um resumo dos resultados de caracterização dos agregados naturais e reciclados utilizados na pesquisa. Nos subitens seguintes são discutidos tais resultados.

Tabela 25 – Resultados dos ensaios de caracterização realizados nos agregados naturais e reciclados desta pesquisa.

Agregados	Densidade aparente (g/cm ³) – (DNER-ME 081/98 – graúdo e 084/95-miúdo)	Módulo de finura (NBR 7211/2009)	Abrasão <i>Los Angeles</i> (%) - (DNER-ME 035/98 e NBR-NM 51/2001) (≤50%)	Durabilidade /Sanidade (solução sulfato de sódio) - % (DNER-ME 089/94: máx. 12%)	Absorção de água (%) - (DNER-ME 081/98)	Índice de forma (%) - (DNER-ME 086/94)	Adesividade (DNER-ME 078/94)	Equivalente de areia (%) - (≤55%) – (DNER-ME 054/97)
Brita 25 reciclada	2,346	7,290	43,40	—	4,25	0,75	satisfatória	—
Brita 19	2,780		25,00	2,00	0,58	0,50	satisfatória	—
Brita 16	2,737				0,59		satisfatória	—
Brita 12	2,700				0,88		—	—
Pedrisco reciclado	2,214	5,890	45,65	—	6,50	—	—	—
Pó de pedra	2,650		—	—	—	—	—	70,00
Areia	2,630		—	—	—	—	—	81,30

5.1.1 Análise granulométrica (DNER-ME 083/98)

A Tabela 26 apresenta os resultados do ensaio de granulometria e a Figura 18 representa as curvas granulométricas de cada um dos agregados utilizados nesta pesquisa.

Tabela 26: Granulometria dos agregados naturais e reciclados utilizados nas misturas estudadas.

Peneiras		Porcentagem passante						
		brita 25 reciclada	brita 19 natural	brita 16 natural	brita 12 natural	pedrisco reciclado	pó de pedra natural	areia natural
25,4	1"	99,8%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
19,1	3/4"	67,0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
12,7	1/2"	15,9%	43,6%	90,5%	99,4%	100%	100%	100%
9,5	3/8"	3,6%	20,7%	59,2%	90,8%	99,3%	100%	100%
4,8	nº4	1,2%	1,2%	7,1%	15,8%	27,5%	95,9%	100%
2,0	nº10	1,2%	0,5%	5,1%	4,7%	2,0%	63,8%	97,5%
0,42	nº40	1,0%	0,4%	2,0%	2,8%	1,5%	30,0%	58,9%
0,177	nº80	0,8%	0%	1,0%	2,0%	1,0%	16,4%	22,6%
0,074	nº200	0,7%	0%	0,5%	1,1%	0,8%	8,8%	6,3%

Pela Tabela 26, pode-se observar que o ARC de maior dimensão foi classificado como brita 25 e o de menor grão como pedrisco 9,5.

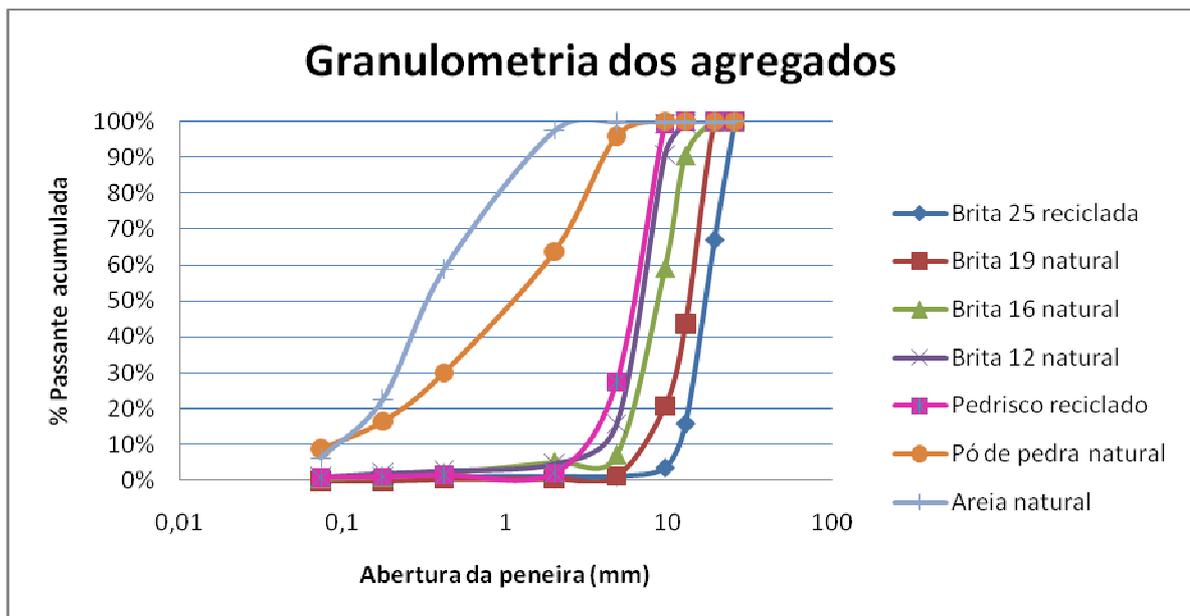


Figura 18 – Curvas granulométricas dos agregados pesquisados.

As curvas granulométricas indicam que os agregados graúdos possuem distribuição granulométrica aberta, uniforme, com poucos finos (grãos menores que 0,075 mm), pois, nas frações finas a curva torna-se abatida e aproxima-se de zero.

Quanto aos agregados miúdos, o pó de pedra apresenta uma distribuição granulométrica mais contínua do que a areia natural.

A curva granulométrica com faixa contínua é característica e adequada para misturas asfálticas densas, como as pesquisadas neste estudo.

Com base nesta distribuição granulométrica, foram calculados os traços para dosagem das cinco misturas, incluindo a mistura de referência (Tabelas 27, 28, 29, 30 e 31).

As curvas granulométricas de cada uma das cinco misturas estudadas respeitaram os limites da faixa B do Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), conforme demonstram as Figuras 19, 20, 21, 22 e 23.

Observou-se que, apesar de haver quebra dos agregados (tanto naturais quanto reciclados) durante a compactação manual pelo soquete Marshall, a composição granulométrica das cinco misturas manteve-se dentro da faixa B do DNIT.

Tabela 27 – Traço 1 com 0% de agregado graúdo reciclado (T_{0%} - mistura de referência).

Peneiras		Gran. Mist.	Ponto Médio da Faixa "B" do DNIT	Faixa de Trabalho da Mistura		Faixa " B " do DNIT	
Pol	mm						
2"	50,8	-					
1 1/2"	38,1	100,0	100,0			100	100
1"	25,4	100,0	97,5			95	100
3/4"	19,1	100,0	90,0	93,0	100,0	80	100
3/8"	9,5	70,9	62,5	63,9	77,9	45	80
No. 4	4,8	51,2	44,0	46,2	56,2	28	60
No. 10	2,0	36,2	32,5	31,2	41,2	20	45
No. 40	0,42	18,5	21,0	13,5	23,5	10	32
No. 80	0,177	9,1	14,0	7,1	11,1	8	20
No. 200	0,074	4,3	5,5	3,0	6,3	3	8

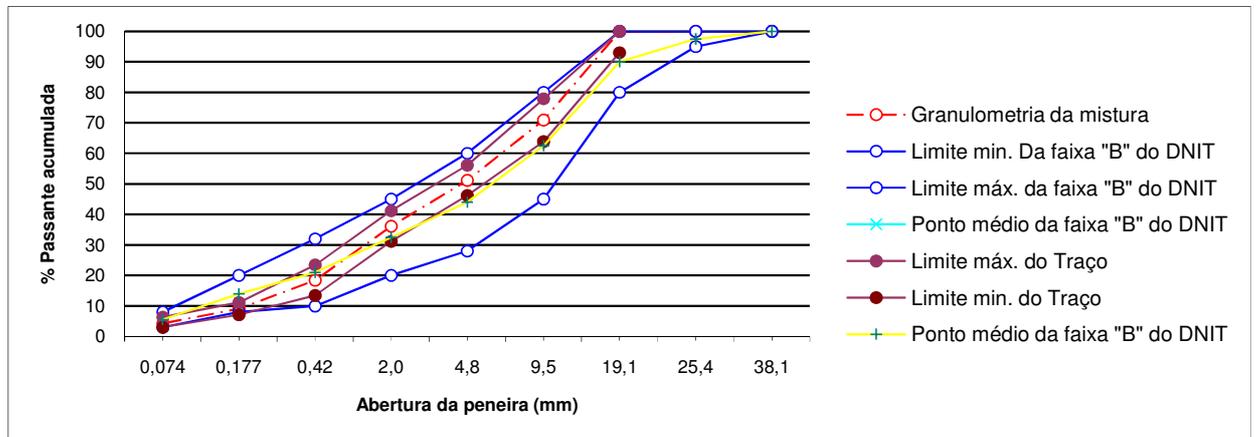


Figura 19 - Curva granulométrica do Traço 1 ($T_{0\%}$) com 0% de agregado graúdo reciclado (mistura de referência).

Tabela 28 – Traço 2 com 25% de agregado graúdo reciclado ($T_{25\%}$).

Peneiras		Gran. Mist.	Ponto Médio da Faixa "B" do DNIT	Faixa de Trabalho da Mistura		Faixa " B " do DNIT	
Pol	mm						
2"	50,8	-					
1 1/2"	38,1	100,0	100,0			100	100
1"	25,4	100,0	97,5			95	100
3/4"	19,1	97,5	90,0	90,52	100,00	80	100
3/8"	9,5	77,4	62,5	70,44	80,00	45	80
No. 4	4,8	52,5	44,0	47,49	57,49	28	60
No. 10	2,0	37,4	32,5	32,37	42,37	20	45
No. 40	0,42	18,8	21,0	13,79	23,79	10	32
No. 80	0,177	9,3	14,0	8,00	11,30	8	20
No. 200	0,074	4,4	5,5	3,00	6,43	3	8

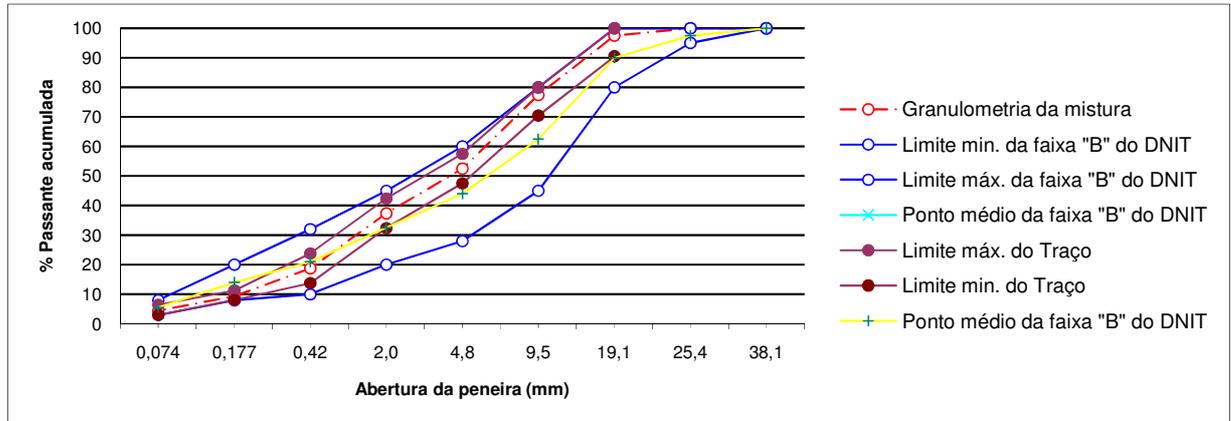


Figura 20 – Curva granulométrica do Traço 2 (T_{25%}) com 25% de agregado graúdo reciclado.

Tabela 29 – Traço 3 com 50% de agregado graúdo reciclado (T_{50%}).

Peneiras		Gran. Mist.	Ponto Médio da Faixa "B" do DNIT	Faixa de Trabalho da Mistura		Faixa " B " do DNIT	
Pol	mm						
2"	50,8	-					
1 1/2"	38,1	100,0	100,0			100	100
1"	25,4	100,0	97,5			95	100
3/4"	19,1	93,4	90,0	86,4	100,0	80	100
3/8"	9,5	78,4	62,5	71,4	80,0	45	80
No. 4	4,8	53,9	44,0	48,9	58,9	28	60
No. 10	2,0	36,8	32,5	31,8	41,8	20	45
No. 40	0,42	18,9	21,0	13,9	23,9	10	32
No. 80	0,177	9,5	14,0	8,0	11,5	8	20
No. 200	0,074	4,6	5,5	3,0	6,6	3	8

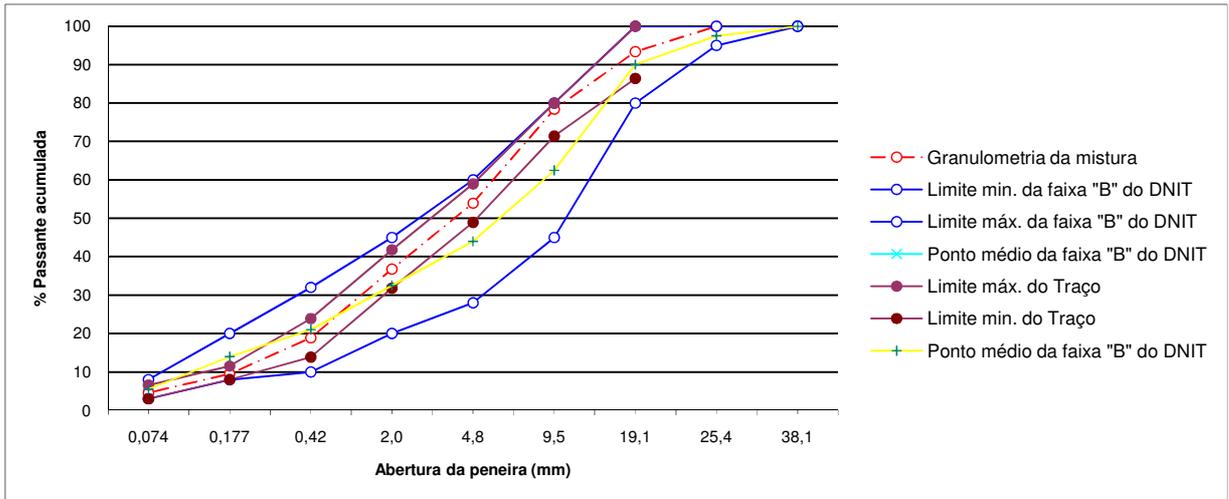


Figura 21 – Curva granulométrica do Traço 3 (T_{50%}) com 50% de agregado graúdo reciclado.

Tabela 30 – Traço 4 com 75% de agregado graúdo reciclado (T_{75%}).

Peneiras		Gran. Mist.	Ponto Médio da Faixa "B" do DNIT	Faixa de Trabalho da Mistura		Faixa " B " do DNIT	
Pol	mm						
2"	50,8	-					
1 1/2"	38,1	100,0	100,0			100	100
1"	25,4	99,9	97,5	92,9	100,0	95	100
3/4"	19,1	90,1	90,0	83,1	97,1	80	100
3/8"	9,5	69,9	62,5	62,9	76,9	45	80
No. 4	4,8	52,8	44,0	47,8	57,8	28	60
No. 10	2,0	36,4	32,5	31,4	41,4	20	45
No. 40	0,42	18,7	21,0	13,7	23,7	10	32
No. 80	0,177	9,4	14,0	8,0	12,4	8	20
No. 200	0,074	4,5	5,5	3,0	6,5	3	8

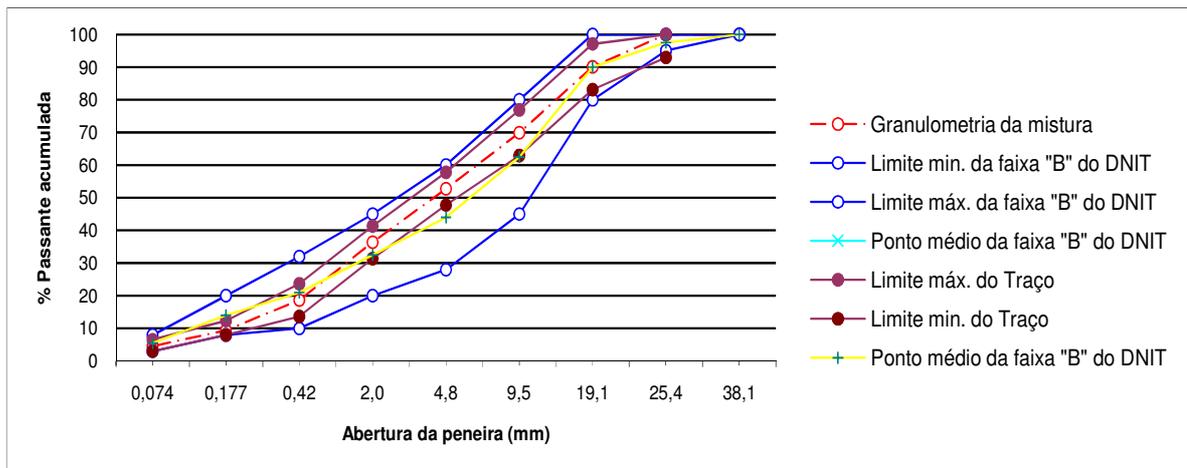


Figura 22 – Curva granulométrica do Traço 4 ($T_{75\%}$) com 75% de agregado graúdo reciclado.

Tabela 31 – Traço 5 com 100% de agregado graúdo reciclado ($T_{100\%}$).

Peneiras		Gran. Mist.	Ponto Médio da Faixa "B" do DNIT	Faixa de Trabalho da Mistura		Faixa "B" do DNIT	
Pol	mm						
2"	50,8	-					
1 1/2"	38,1	100,0	100,0			100	100
1"	25,4	99,9	97,5			95	100
3/4"	19,1	91,7	90,0	84,7	100,0	80	100
3/8"	9,5	75,7	62,5	68,7	80,0	45	80
No. 4	4,8	55,9	44,0	50,9	60,0	28	60
No. 10	2,0	39,4	32,5	34,4	44,4	20	45
No. 40	0,42	21,4	21,0	16,4	26,4	10	32
No. 80	0,177	9,9	14,0	7,9	11,9	8	20
No. 200	0,074	4,3	5,5	3,0	6,3	3	8

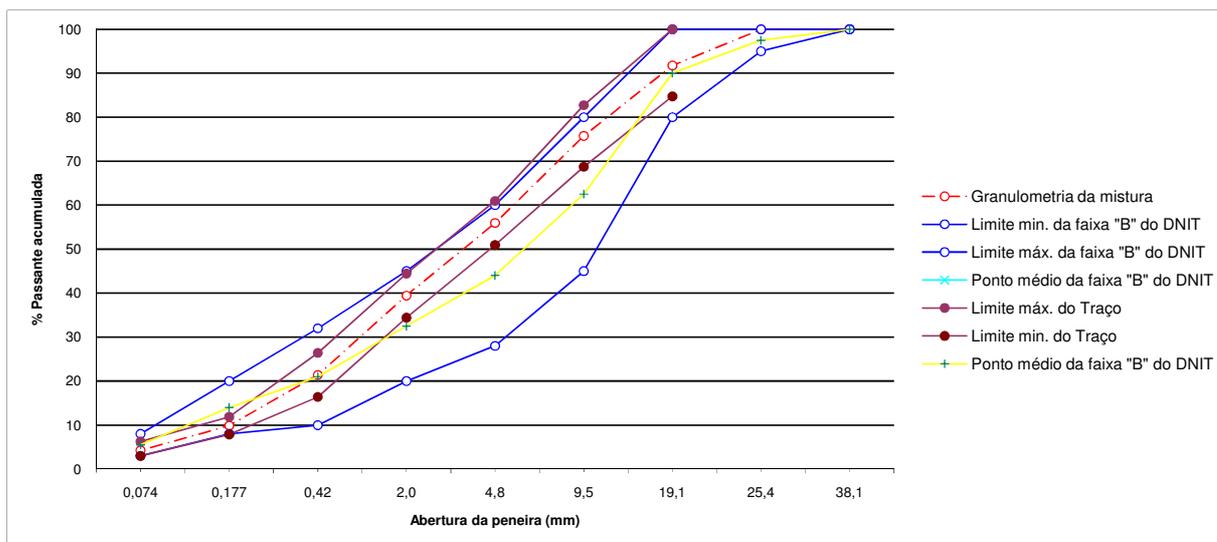


Figura 23 – Curva granulométrica do Traço 5 ($T_{100\%}$) com 100% de agregado graúdo reciclado.

5.1.2 - Absorção e Densidade do agregado graúdo (DNER-ME 081/98) e Densidade real do agregado miúdo (DNER-ME 084/95)

Segundo Kandhal; Mallik (1997), nos Estados Unidos o valor máximo permitido para absorção de água de agregados varia entre 2% e 6%. A brita 25 reciclada apresentou absorção igual a 4,25% e o pedrisco 9,5 reciclado obteve absorção igual a 6,50%, ligeiramente superior ao limite máximo estabelecido. Entretanto, considera-se neste trabalho que descartar os ARC (agregados reciclados de concreto) apenas pela elevada absorção pode ser precipitado. As demais características dos agregados reciclados devem ser observadas, assim como os parâmetros volumétricos da dosagem Marshall, para que se possa afirmar se a absorção elevada, comum nos agregados reciclados de concreto, é fator impeditivo para o seu aproveitamento em CBUQ.

Com relação às pesquisas anteriores (indicadas na Tabela 11 do Capítulo 2), é possível observar que os resultados obtidos neste estudo estão dentro da média. Porém, alguns pesquisadores apresentam resultados com diferenças significativas que podem estar relacionadas ao tipo e resistência do concreto, técnica construtiva empregada, idade do material cimentício, tipo de britagem da usina de reciclagem, graduação do agregado reciclado, quantidade de argamassa aderida, erros na obtenção dos resultados durante a realização dos ensaios, etc (SANTOS, 2007).

Comparando-se a absorção e a densidade aparente dos agregados graúdos utilizados nas misturas pesquisadas, verifica-se que os reciclados de concreto possuem maior absorção e, conseqüentemente, menor densidade quando comparados aos agregados naturais (Figura 24), devido à alta porosidade.

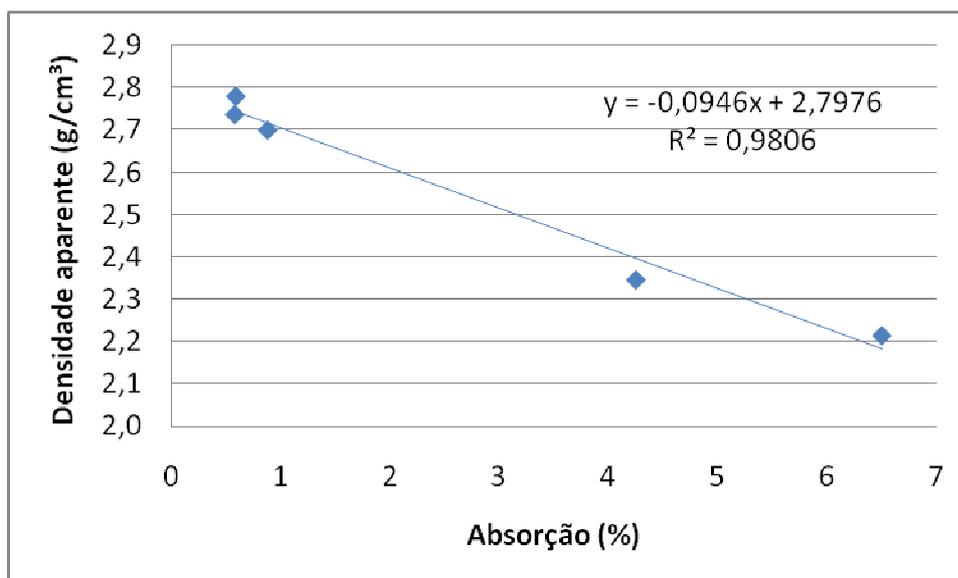


Figura 24 – Densidade aparente dos agregados graúdos *versus* absorção.

5.1.3 – Desgaste por abrasão *Los Angeles* (DNER-ME 035/98 e NBR-NM 51/2001)

De acordo com a Norma Rodoviária DNER – ME 035/98, o valor da abrasão *Los Angeles* limita-se entre 40 e 55% e pelos critérios normativos NBR-NM 51/2001, no máximo 50%. O agregado reciclado graúdo de concreto apresentou desgaste por abrasão *Los Angeles* igual a 43,40% (brita 25) e 45,65% (pedrisco 9,5mm). Observa-se que estes valores são superiores ao da brita natural (que apresentou média dos valores de abrasão igual a 25%), porém encontram-se dentro dos limites aceitos para uso em pavimentação. Esta diferença entre a brita natural e o ARC (agregado reciclado de concreto) provavelmente ocorre em função da maior porosidade do agregado reciclado (comprovada pela sua maior absorção de água) que diminui sua resistência ao desgaste, porosidade esta presente tanto no seu interior quanto na argamassa aderida a sua superfície. Comparando-se os resultados da abrasão *Los Angeles* do

agregado reciclado de concreto desta pesquisa com estudos anteriores (Tabela 11 do Capítulo 2), verifica-se que estão dentro da média, apesar dos poucos dados disponíveis.

Observa-se pela Figura 25, que a absorção dos agregados também interfere na abrasão *Los Angeles*, de forma que, quanto maior a absorção/porosidade, maior será o desgaste por abrasão destes agregados.

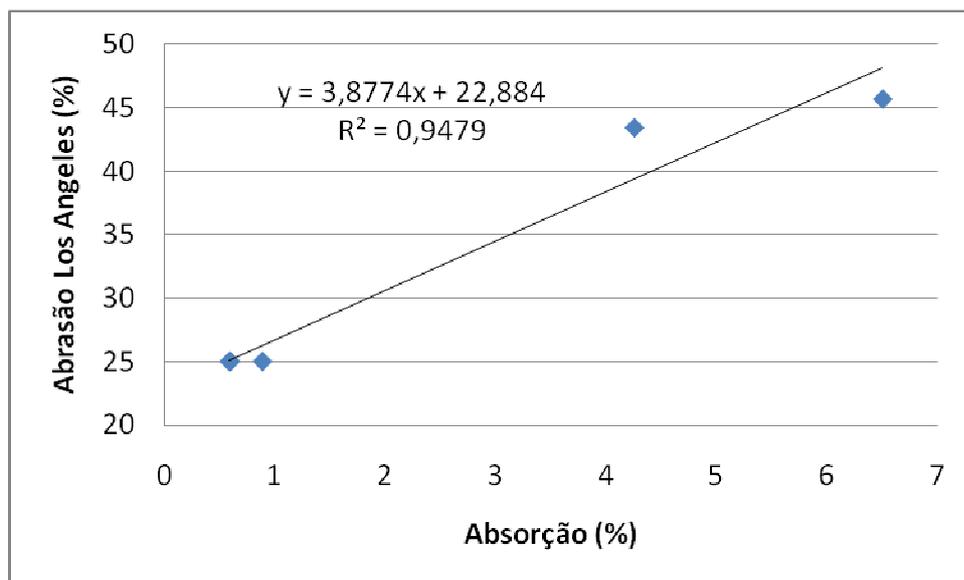


Figura 25 – Abrasão *Los Angeles* versus absorção de água dos agregados graúdos.

5.1.4 - Índice de forma do agregado graúdo (DNER-ME 086/94)

Agregados com partículas achatadas e alongadas não são considerados adequados para pavimentação devido à suscetibilidade ao esmagamento quando submetidos à compactação e à ação das cargas do tráfego. A forma angular e a superfície rugosa dos ARC (agregados reciclados de concreto) utilizados na pesquisa são características que favorecem o aumento da resistência ao cisalhamento interno das misturas e à deformação permanente.

O agregado reciclado estudado nesta pesquisa apresenta índice de forma (0,75) maior que o da brita natural (0,50), indicando que a sua cubicidade é fator positivo no intertravamento do esqueleto mineral da mistura.

Os bons resultados de índice de forma dos agregados reciclados devem ser em virtude de terem origem em concreto e não em material cerâmico e também pelo processo de britagem

da usina de reciclagem com britador de impacto e não de mandíbula, como normalmente ocorre em pedreiras.

5.1.6 Adesividade ao ligante betuminoso (DNER-ME 078/94)

Os ensaios solicitados pela Pedreira Líder e os dados fornecidos pela Usina Andrade Guedes indicam que o agregado natural utilizado nesta pesquisa é de origem granítica, constituído principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo. De acordo com a classificação de rochas (METSO MINERALS, 2005), caso o teor de sílica presente seja maior que 65%, o agregado natural é considerado ácido. Segundo Bernucci *et al.* (2007), a acidez pode interferir negativamente na adesividade ao ligante. No entanto, com a realização do ensaio de adesividade conforme DNER-ME 078/94, observou-se que tal fato não ocorreu nos agregados utilizados nesta pesquisa.

Não foram realizados exames petrográficos nas amostras de agregado reciclado de concreto. Em função da heterogeneidade normalmente presente em resíduos de construção, mesmo nos de concreto, sua denominação petrológica é desconhecida. No entanto, o ARC (agregado reciclado de concreto) da pesquisa apresentou adesividade satisfatória.

Durante a realização das misturas, constatou-se que os agregados reciclados apresentaram maior dificuldade em serem totalmente envolvidos pelo ligante, causando um aumento no tempo de mistura dos traços compostos com AGR (agregado graúdo reciclado). Porém, no momento da extração do betume, os ARC (agregados reciclados de concreto) apresentaram maior resistência para ficarem totalmente livres do ligante. Tal fato sugere que a adesividade do ARC apresenta-se de forma diferente da brita natural, provavelmente em função da elevada porosidade, permitindo que o ligante penetre mais profundamente que no agregado natural durante os processos de mistura e compactação.

De acordo com GOUVEIA *et al.* (2004) a absorção de ligante pelo agregado pode ser um fator positivo para melhorar a adesividade, caso a absorção ocorra em pequena quantidade, facilitando o intertravamento mecânico da mistura. Do contrário, em caso de elevada absorção do ligante pelo agregado, ocorre a diminuição da espessura da película de CAP (cimento asfáltico de petróleo) que recobre o agregado, podendo tornar a mistura mais susceptível à ação deletéria da água. Os fatores que mais interferem na absorção do ligante são: distribuição, quantidade e tamanho dos poros do agregado. A composição química e mineral do agregado também influi nesta absorção.

5.1.7 Equivalente de areia do agregado miúdo (DNER-ME 054/97)

A porcentagem de argila presente nos grãos da fração fina, verificada através do ensaio de equivalente de areia, deve ser limitada ($\leq 55\%$) devido à expansividade que pode provocar o rompimento das partículas de ligante que envolve os agregados na mistura, o que dificulta a adesão entre as partículas.

Os agregados miúdos utilizados na pesquisa (pó de pedra e areia) não foram reciclados e apresentaram valores em conformidade com a norma DNER-ME 054/97 (Tabela 25, item 5.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Os concretos betuminosos usinados a quente desta pesquisa, dosados com agregado graúdo reciclado e lavado de concreto, de modo geral respeitaram os parâmetros definidos no método de dosagem Marshall.

As propriedades mecânicas analisadas: estabilidade, fluência, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e vida de fadiga, apresentaram resultados com valores próximos aos da mistura de referência (com 100% de agregado natural), indicando uma possível viabilidade técnica para o uso destes agregados em misturas asfálticas a quente.

No entanto, na revisão bibliográfica realizada pela autora, observa-se que os pesquisadores ainda não chegaram a um consenso. Alguns pesquisadores (SHEN; DU, 2004; ALJASSAR; AL-FADALA, 2005; WONG *et al.*, 2007; MILLS-BEALE; YOU, 2010) relataram que as misturas asfálticas a quente feitas com agregado reciclado de concreto apresentaram durabilidade adequada e bons resultados nas propriedades volumétricas e mecânicas. Por outro lado, outros pesquisadores (PARANAVITHANA; MOHAJERANI, 2006; PÉREZ *et al.*, 2010), observaram que, apesar de num primeiro momento os CBUQ produzidos com agregados reciclados de concreto apresentarem bons resultados volumétricos e mecânicos, devido à ação da água, provaram ter durabilidade insuficiente.

Pela adesividade e potencial de penetração do ligante devido às reentrâncias comuns na superfície do agregado reciclado de concreto, como também pela sua elevada porosidade, acredita-se que o maior tempo de mistura dedicado aos traços com AGR (agregados graúdos

reciclados) deste estudo tenha proporcionado uma adequada cobertura, elevada coesão e impermeabilidade aos grãos do agregado reciclado. Por outro lado, isto é apenas uma suposição, pois, nesta pesquisa, não foram realizados ensaios para verificação da durabilidade e sensibilidade à ação da água.

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados em função das diversas variáveis de resposta estudadas (Tabela 33) e observando-se os valores limites para as características especificadas com base na norma DNIT 031/2006 – ES, conforme Tabela 32.

Tabela 32 – Especificações da norma DNIT 031/2006 – ES.

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de vazios %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios (RBV)	DNER-ME 043	75 a 82	65 a 72
Estabilidade mínima (Kgf) para 75 golpes	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima. (MPa)	DNER-ME 138	0,65	0,65

Tabela 33 - Resultados encontrados no controle qualitativo das cinco misturas estudadas, com 5% de ligante.

Traços	% de Ligante na mistura	DENSIDADE (g/cm ³)		Vvazios (%) - 3% a 5% (r) ou 4% a 6% (l)	VCB (%)	VAM (%) - mín. 14%	RBV (%) - 75% a 82% (r) ou 65% a 72% (l)	Estabilidade (kgf) - mín. 500 (75 golpes)	Fluência (1/100'')	MR (MPa)	RT (MPa) - mín. 0,65	MR/RT
		Aparente	Teórica									
T _{0%}	5,00%	2,399	2,502	4,12%	11,6%	15,8%	73,95%	857	13,4	6806,67	1,94	3508,59
T _{25%}	5,00%	2,316	2,428	4,61%	11,2%	15,9%	70,96%	724	12,5	5369,00	1,70	3158,23
T _{50%}	5,00%	2,317	2,396	3,30%	11,3%	14,6%	77,32%	804	13,2	5697,00	1,83	3113,11
T _{75%}	5,00%	2,270	2,353	3,53%	11,0%	14,6%	75,90%	636	8,5	5818,11	1,82	3196,76
T _{100%}	5,00%	2,263	2,289	1,14%	11,0%	12,1%	90,90%	551	9,8	5083,00	1,87	2718,18
FROTA ⁽¹⁾ <i>et al.</i> (2005)	8,00%	—	—	7,98% a 8,19%	22,91% a 23,50%	14,93% a 15,31%	63,02% a 65,15%	974 a 1067	—	—	—	—
GUIMARÃES ⁽²⁾ <i>et al.</i> (2005)	8,00%	2,251	—	4,00%	—	—	80%	1271	28	—	—	—
PARANA VITHAN <i>A et al.</i> (2006)	6,5%	2,345 a 2,348	2,434	3,6% a 3,7%	12,6% a 12,7%	—	71,2% a 71,9%	—	—	3147 a 3395	—	—
RON <i>et al.</i> (2008)	7,60%	—	—	2,00% a 7,00%	—	—	—	—	—	2931,00	0,96	3151,00
SILVA ⁽³⁾ (2009)	9,00% a 11,00%	1,951 a 1,982	2,112 a 2,072	7,60% a 4,30%	23,5% a 23,6%	15,8% a 19,3%	67,5% a 81,7%	1566 a 878	—	3305,00 a 3864,00	0,51 a 0,63	6502,00 a 6117,00

Obs.:

- (1) Dosagem realizada pelo método *Superpave* utilizando-se o CAP 20;
- (2) Dosagem realizada pelo método Marshall utilizando-se o CAP 20 e na faixa C do DNIT;
- (3) Considerando-se a mistura dosada com CAP 50/70 e na faixa B do DNIT;

Nos intervalos de valores decrescentes, significa que à medida que o teor de ligante sobe, os valores decrescem;

Os valores destacados em vermelho correspondem aos resultados em desacordo com as especificações volumétricas da dosagem Marshall.

Em estudos anteriores (conforme comparativo da Tabela 33), observa-se que os teores de projeto para os CBUQ com ARC (agregados reciclados de concreto) eram bastante elevados, variando entre 6,5% e 11%. Segundo Bernucci *et al.* (2007), o CAP representa de 25% a 40% do custo da construção do revestimento. O aumento no teor de projeto pode desestimular o uso de agregados reciclados nas misturas.

Os traços de CBUQ com AGR (agregado graúdo reciclado) desta pesquisa conseguiram respeitar os parâmetros volumétricos da dosagem Marshall mantendo o mesmo teor de projeto do traço de referência, 5%. Apenas no Traço 5 (T_{100%}), em que houve substituição de 100% do agregado graúdo natural pelo reciclado, não foi possível a obtenção de resultados satisfatórios (para parâmetros como, por exemplo, VAM – vazios do agregado mineral e RBV – relação betume/vazios), nem com o aumento do teor de ligante.

A DMT (densidade máxima teórica) foi estabelecida pela média ponderada da densidade aparente, em função da absorção dos reciclados.

5.2.1 Volume de vazios (Vv%)

Apenas o Traço 5 (T_{100%}), com 100% de agregado graúdo reciclado apresentou volume de vazios (Vv%) igual a 1,14% para 5% de teor de ligante, abaixo do intervalo de valores especificado pela norma DNIT 031/2006 – ES (3% a 5% para camadas de rolamento e 4% a 6% para camadas de ligação – *binder*). Nas demais misturas híbridas não foram observadas diferenças visíveis e representativas na coesão e na quantidade de vazios (Vv%) entre os corpos de prova da mistura de referência e os realizados com o agregado reciclado (Tabela 33).

Com o aumento no teor de ligante das cinco misturas, o volume de vazios diminuiu, indicando o preenchimento pelo ligante.

Pela Figura 26, pode-se observar a semelhança entre as linhas de tendência das misturas 1 (referência – T_{0%}), 2 (T_{25%}), 3 (T_{50%}) e 4 (T_{75%}). Apenas a mistura 5 (T_{100%}), com 100% de agregado graúdo reciclado, apresentou resultados bem diferenciados do volume de vazios para os mesmos percentuais de ligante das demais misturas.

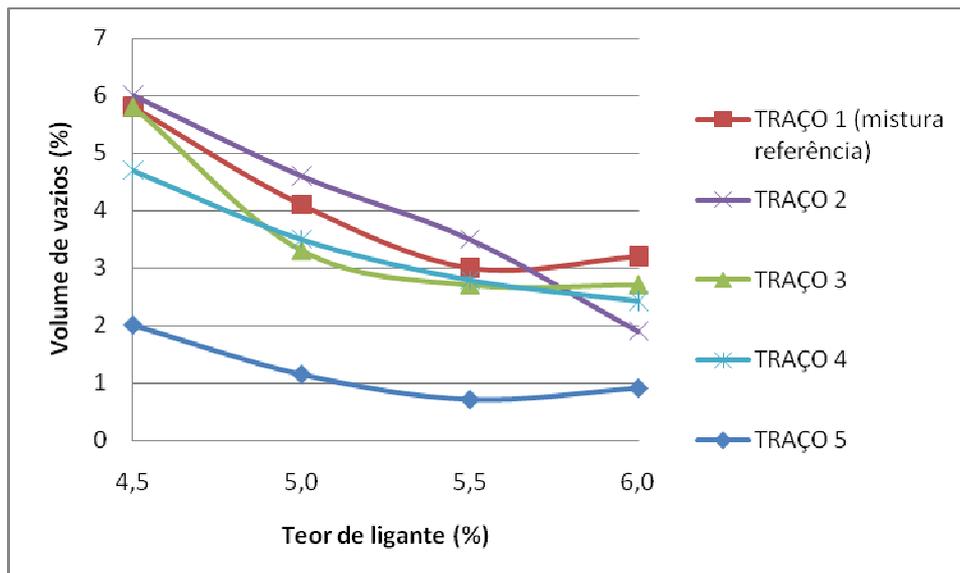


Figura 26 – Volume de vazios (Vv) versus teor de ligante.

A Tabela 34 mostra a média ponderada da absorção dos agregados graúdos que compõem cada um dos cinco traços estudados e o volume de vazios.

Tabela 34 – Média ponderada da absorção dos agregados graúdos que compõem os traços das cinco misturas estudadas para 5% de ligante.

Misturas	Absorção - agregados graúdos (%)	Vv (%)
Traço 1 (T _{0%})	0,68	4,1
Traço 2 (T _{25%})	1,72	4,6
Traço 3 (T _{50%})	2,79	3,3
Traço 4 (T _{75%})	3,75	3,5
Traço 5 (T _{100%})	5,38	1,1

Apenas o Traço 2 (com 25% de AGR) não manteve a tendência de diminuição do Vv(%) das misturas com o aumento da absorção/porosidade dos agregados. Existe a correlação entre a média ponderada da absorção/porosidade dos agregados componentes das misturas e o volume de vazios (Figura 27). É provável que até um determinado valor de absorção destes agregados seja possível respeitar o Vv(%) especificado pela dosagem Marshall.

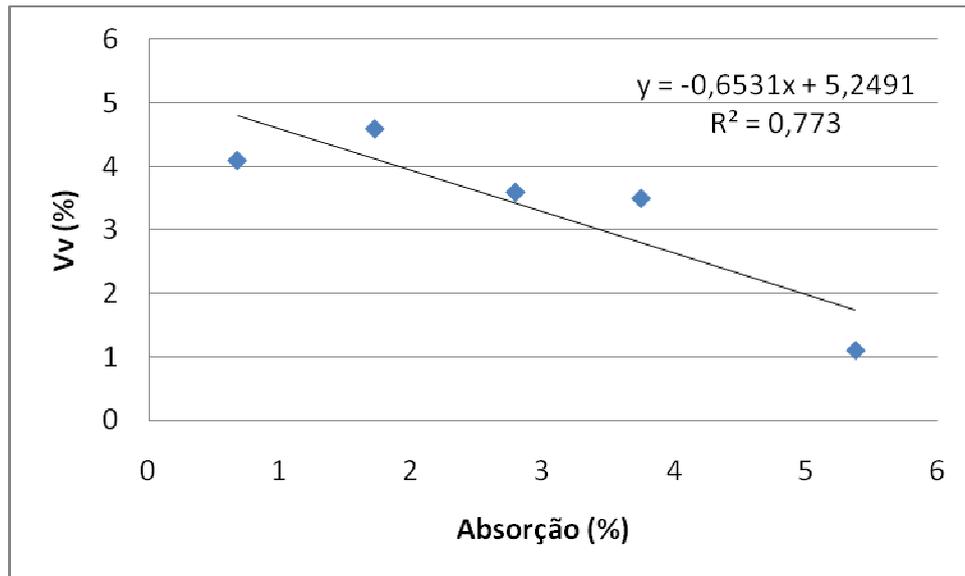


Figura 27 – Volume de vazios versus absorção de água.

Observando-se a Figura 27, verifica-se que quanto maior a absorção dos agregados que compõem cada uma das cinco misturas estudadas, menor o Vv (%). Indicando que parte do ligante das misturas é absorvida pelos agregados que a constituem.

5.2.2 Vazios do agregado mineral (VAM%)

Com relação ao parâmetro vazios do agregado mineral (VAM%), observando-se a Figura 28, fica evidente a semelhança entre as quatro misturas dosadas com o agregado reciclado e a mistura de referência.

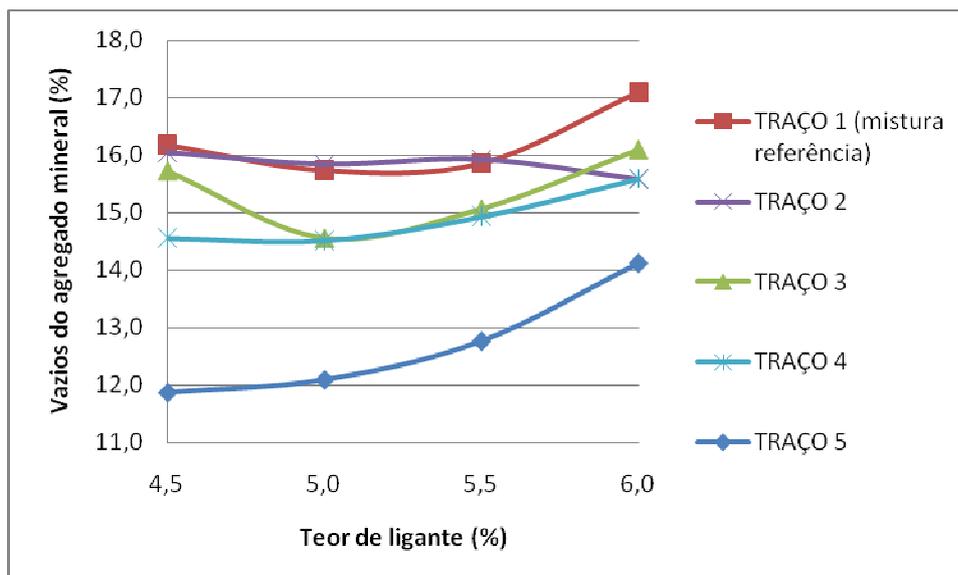


Figura 28 – Vazios do agregado mineral (VAM) versus teor de ligante.

O TNM dos agregados nas misturas híbridas (com ARC – agregados reciclados de concreto) foi 25,4 mm. Pelas especificações da norma DNIT 031/2006, os $VAM_{\text{mín.}}$ para este tamanho de agregado, teriam que ser 14%. Na mistura de referência (com 100% de agregado natural) o TNM dos agregados foi 19,1mm, portanto $VAM_{\text{mín.}}$ seria igual a 15%. Todas as misturas apresentaram pouquíssima variação nos resultados de VAM, que ficaram entre 15,74% ($T_{0\%}$) e 12,09% ($T_{100\%}$) para um teor de projeto de 5% de ligante. Apenas a mistura $T_{100\%}$ (com 100% de agregado graúdo reciclado), não obteve valor satisfatório de VAM, descumprindo a especificação do DNIT.

Os valores de VAM são a soma do V_v (volume de vazios) e VCB (vazios cheios de betume). Os VCB dependem diretamente das densidades dos materiais das misturas (agregados e ligante) e do percentual de ligante. É precipitado considerar apenas este parâmetro isoladamente, pois, com exceção do traço 5 (com 100% AGR), os resultados obtidos para os demais parâmetros volumétricos foram satisfatórios.

É importante estar atento ao comportamento heterogêneo das misturas asfálticas bastante influenciado pelas interações físico-químicas dos seus componentes individuais. Os vazios do agregado mineral (VAM) representam o espaço intergranular do esqueleto mineral. Valores de VAM muito baixos levam a baixos teores de ligantes, talvez este fato explique porque nesta pesquisa o teor ótimo manteve-se inalterado nas misturas estudadas.

Diferentemente, nas demais pesquisas realizadas por Frota *et al.*, (2005) e Silva, (2009), onde VAM ficou em torno de 23%, o teor de ligante subiu consideravelmente. Por outro lado,

acredita-se que pequenos valores de VAM e baixos teores de ligante podem comprometer o desempenho à fadiga e a durabilidade das misturas, indicando que o filme de ligante delgado recobrando os agregados é insuficiente. Valores de VAM excessivamente altos podem levar à redução da resistência ao cisalhamento e perda do intertravamento do esqueleto mineral.

5.2.3 Relação betume/vazios (RBV%)

A relação betume/vazios (RBV%) é considerada, juntamente com o volume de vazios (Vv%), um parâmetro de fundamental importância para a definição do teor ótimo de ligante da mistura. Apenas a mistura 5 (T_{100%}), com 100% de agregado graúdo reciclado não obteve valor de RBV dentro do intervalo especificado²⁰ pela norma DNIT 031/2006 – ES. As demais misturas apresentaram resultados bem próximos ao da mistura de referência.

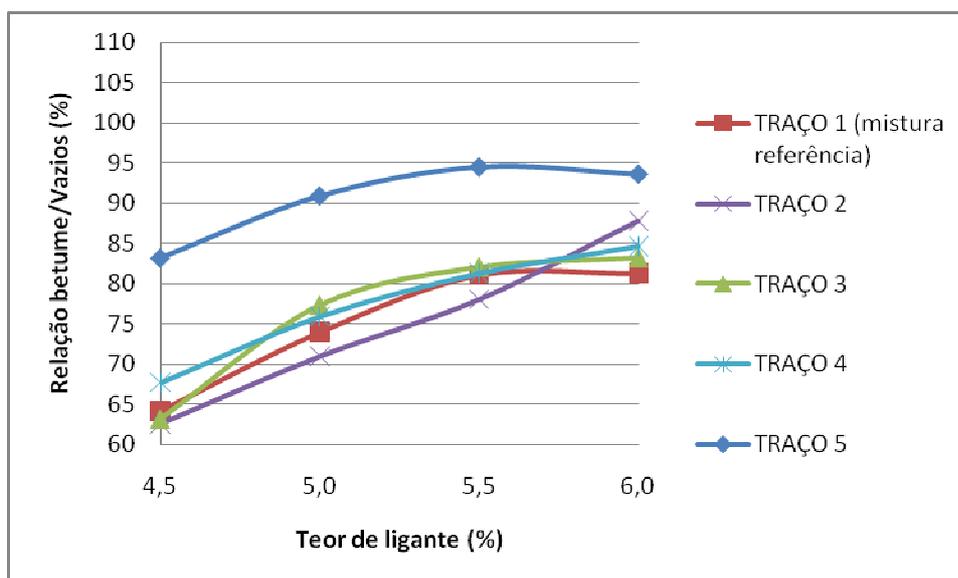


Figura 29 – Relação Betume/Vazios *versus* teor de ligante.

²⁰ De acordo com a norma DNIT 031/2006, os valores de RBV para camadas de rolamento devem ser: 75% a 82%; e para camadas de ligação (*binder*): 65% a 72%.

5.2.4 Vazios cheios de betume (VCB%)

Para um mesmo teor de ligante de 5% nas cinco misturas, incluindo a mistura 1 (referência), verifica-se que os valores da porcentagem de vazios cheios de betume (VCB %) não apresentaram nenhuma alteração significativa. No entanto, percebe-se que à medida que aumenta o percentual de AGR (agregado graúdo reciclado) nas misturas, há uma diminuição no VCB (%), para um mesmo teor de ligante. Tal fato pode ser função da menor densidade aparente do agregado reciclado quando comparada ao agregado natural. Apenas a mistura 5 (com 100% de AGR) obteve um valor de VCB(%) um pouco abaixo (Figura 30).

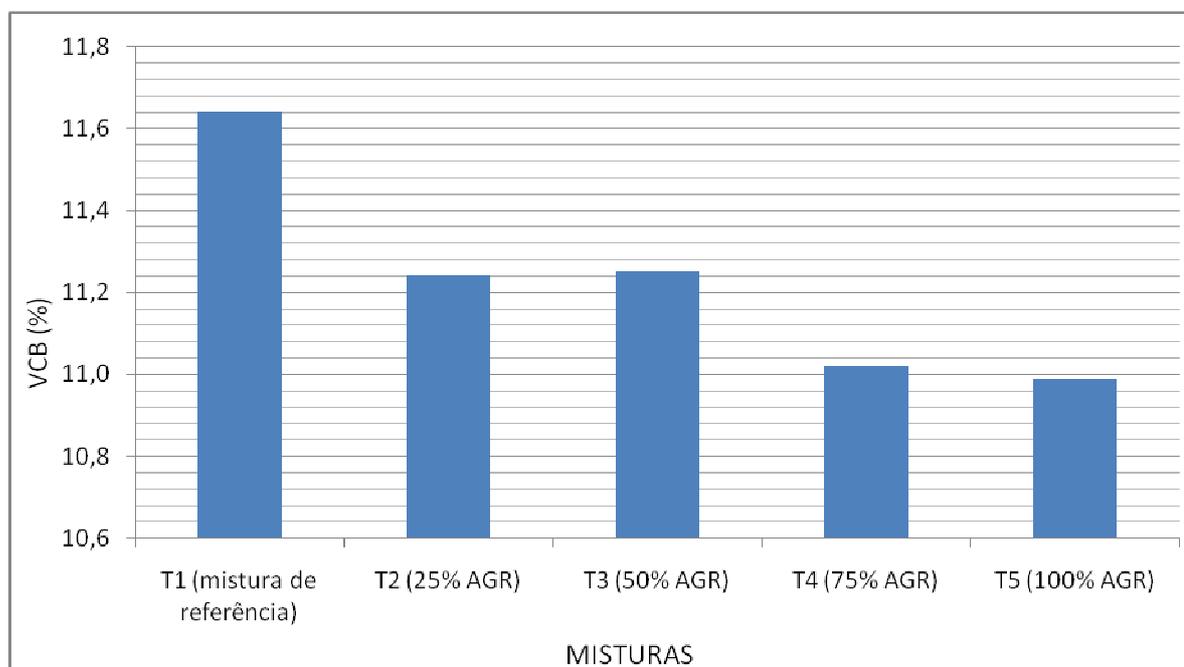


Figura 30 – Vazios cheios de betume (%) das cinco misturas estudadas, para 5% de teor de ligante.

Nos estudos anteriores, Frota *et al.* (2004), Ron *et al.* (2008) e Silva (2009), consideravam que o aumento no teor de ligante das misturas devia-se ao fato da alta porosidade e absorção dos agregados reciclados, porém, na presente pesquisa o aumento no teor de ligante não foi verificado em nenhuma das misturas estudadas.

As pesquisas anteriores (FROTA *et al.*, 2004, RON *et al.*, 2008 e SILVA, 2009) utilizaram *fíler* na dosagem das misturas, provavelmente o aumento na superfície específica dos grãos, ocasionada pela presença dos finos do *fíler*, contribuiu para o aumento no consumo do ligante.

As misturas deste estudo foram dosadas sem *fíler*. Além disto, os agregados reciclados utilizados foram lavados a fim de diminuir a presença de finos.

Outro diferencial desta pesquisa com relação aos estudos anteriores está no diâmetro nominal máximo do agregado reciclado. Nesta pesquisa foi utilizado agregado reciclado de concreto de 25 mm, este fato pode ter contribuído para o teor de ligante permanecer inalterado nas misturas com AGR, em função da menor superfície específica. Pois, em todas as misturas a relação agregado graúdo/agregado miúdo foi constante.

Por outro lado, a absorção do ligante pelo agregado reciclado é fato indiscutível e consenso entre todos os estudos. Apesar de o agregado reciclado demorar mais que o natural para ser totalmente envolvido pelo ligante, no momento da extração do betume, o agregado reciclado apresenta maior resistência para ficar totalmente livre do ligante, sendo visível a presença do mesmo nos poros deste agregado.

5.2.5 Estabilidade

Teoricamente, o maior índice de forma do agregado reciclado contribui positivamente para uma maior estabilidade das misturas. Especialmente em misturas bem graduadas e densas, como as estudadas. No entanto, a presença de argamassa aderida à superfície do agregado reciclado pode ter contribuído para uma menor estabilidade nos traços compostos por AGR (agregado graúdo reciclado). Mesmo assim, todas as misturas estudadas apresentaram estabilidades acima do valor mínimo exigido pela Norma DNIT 031/2006-ES (500 kgf para 75 golpes) (Tabela 36).

Tabela 35 – Índice de forma e agregados graúdos utilizados nas misturas estudadas.

Agregados graúdos utilizados nas misturas	Índice de forma	T _{0%}	T _{25%}	T _{50%}	T _{75%}	T _{100%}
Brita 25 reciclada	0,75	—	X	X	X	X
Brita 19	0,50 (média)	X	—	—	—	—
Brita 16		—	X	—	—	—
Brita 12		X	—	X	X	—
Pedrisco (9,5) reciclado	—	—	X	X	X	X

A Tabela 36 apresenta um resumo dos resultados de estabilidade, fluência, RT e MR dos cinco traços estudados.

Tabela 36 – Resultados dos ensaios de estabilidade, fluência, RT e MR.

Mistura	Teor de ligante	Estabilidade corrigida (kgf)	Fluência (1/100 ^o)	RT (MPa)	MR (MPa)
T _{0%}	5,0%	857	13,4	1,94	6.806,67
T _{25%}	5,0%	724	12,5	1,70	5.369,00
T _{50%}	5,0%	804	13,2	1,83	5.697,00
T _{75%}	5,0%	636	8,5	1,82	5.818,11
T _{100%}	5,0%	551	9,8	1,87	5.083,00

Pela Tabela 36 pode-se observar que entre os quatro traços com AGR (agregado graúdo reciclado) estudados, o que obteve resultados de estabilidade e fluência mais semelhantes à mistura de referência foi o T3 com 50% de agregado graúdo natural. A resistência mecânica de todas as misturas estudadas apresentou valores bem semelhantes e muito pouco abaixo da mistura de referência.

A mistura de referência (Traço 1 – T_{0%}) obteve o maior valor de estabilidade (E = 857 kgf) e os menores valores ocorreram nas misturas 4 (E = 636 kgf) e 5 (E = 551 kgf), com maiores percentuais de agregado graúdo reciclado. No entanto, a mistura 3, com 50% de agregado graúdo reciclado, apresentou estabilidade igual a 804 kgf, superior ao valor obtido na mistura 2, com 25% de agregado graúdo reciclado (E = 724 kgf).

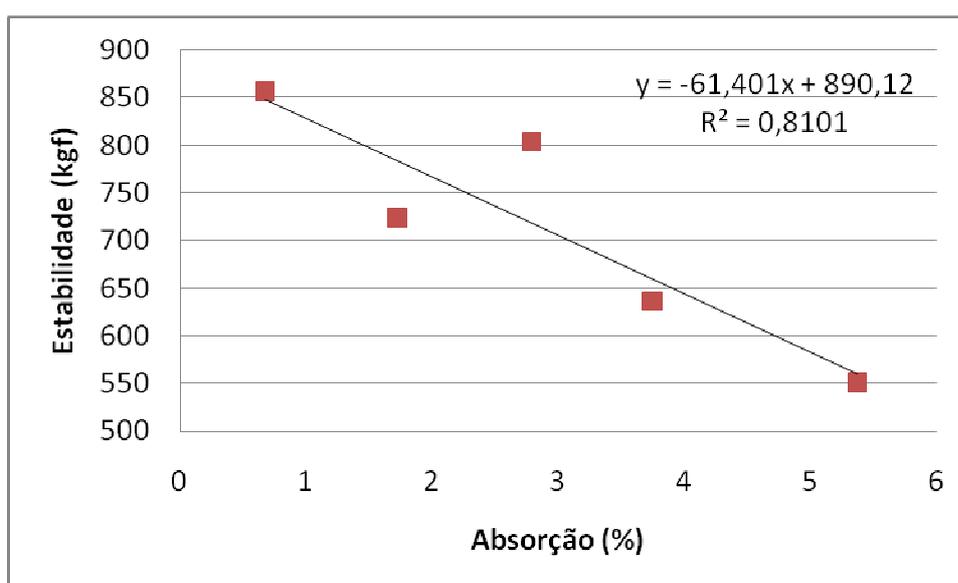


Figura 31 – Estabilidade versus absorção de água.

Observando-se a Figura 31, verifica-se que quanto maior a absorção dos agregados que compõem cada uma das cinco misturas estudadas, menor a estabilidade. Indicando que parte do ligante das misturas é absorvida pelos agregados que a constituem.

5.2.6 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A RT (resistência à tração) foi determinada tirando-se a média dos resultados de três corpos de prova. Os valores médios de RT apresentados para o teor de projeto variaram de 1,696 a 1,943 MPa (Tabela 37). Segundo Bernucci *et al.* (2007) os valores médios de RT para as misturas asfálticas à quente situam entre 0,5 MPa e 2,0 MPa.

Tabela 37 - Módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral das misturas estudadas (25°C).

Características	Faixa (DNIT)	Teor ótimo de ligante	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Traço 1 com 0% de agregado graúdo reciclado (mistura de referência) – CAP 50-70	B	5,0%	6.806,67	1,943	3.508,59
Traço 2 com 25% de agregado graúdo reciclado – CAP 50-70	B	5,0%	5.369,00	1,696	3.158,23
Traço 3 com 50% de agregado graúdo reciclado – CAP 50-70	B	5,0%	5.697,00	1,834	3.113,11
Traço 4 com 75% de agregado graúdo reciclado – CAP 50-70	B	5,0%	5.818,11	1,821	3.196,76
Traço 5 com 100% de agregado graúdo reciclado – CAP 50-70	B	5,0%	5.083,00	1,873	2.718,18

Observando-se os resultados de RT (resistência à tração) contidos na Tabela 37, com exceção do Traço 2 (com 25% AGR), tudo indica que a RT tende a reduzir com o aumento no teor de AGR (agregado graúdo reciclado) na composição das misturas. No entanto, pode-se verificar que, mesmo com 100% de AGR é possível obter valores de RT aceitáveis e pouco diferentes dos resultados da mistura de referência (com 0% de agregado reciclado).

Com o envelhecimento em pista, os valores da RT tendem a aumentar, caracterizando uma perda de flexibilidade e consequente aumento do módulo de resiliência (MR). Verifica-se assim a correlação existente entre os valores de MR e RT para cada tipo de mistura asfáltica.

A relação MR/RT é um parâmetro que vem sendo observado como um provável indicador da vida de fadiga das misturas, por correlacionar informações sobre a rigidez e a resistência. Quanto menor o valor desta razão (MR/RT), menor a rigidez do material, o que é considerado uma vantagem, visto que diminui a absorção das tensões que geram o trincamento prematuro da camada do pavimento. Valores altos de RT (alta resistência à tração) geralmente indicam maior resistência na ruptura e conseqüentemente, maior resistência à fadiga.

Em comparação com os resultados de estudos anteriores (FROTA *et al.*, 2005; GUIMARÃES *et al.*, 2005; RON *et al.*, 2008; SILVA, 2009), as misturas analisadas nesta pesquisa apresentaram valores de MR e RT bem acima, estabilidade menor e relação MR/RT semelhante à pesquisa realizada em Fortaleza por Ron *et al.* (2008). É importante salientar que a RT (resistência à tração), o MR (módulo de resiliência) e a vida de fadiga variam conforme o tipo de mistura, a faixa granulométrica, o tipo de ligante utilizado, as propriedades volumétricas, o método de dosagem e de compactação, temperatura da mistura, da compactação e temperatura de ensaio, etc. Enfim, são inúmeras as variáveis que interferem significativamente nas propriedades mecânicas das misturas.

5.2.7 Módulo de Resiliência

Os valores de MR (módulo de resiliência) das misturas asfálticas tendem a aumentar com o uso e o passar do tempo, devido ao envelhecimento do ligante asfáltico, gerando uma maior rigidez dos revestimentos. Os ensaios de MR e de RT deste estudo foram realizados em corpos de provas com idade de 6 meses. Isto pode ter causado influência nos resultados obtidos, fazendo com que eles fossem superiores aos encontrados em outros trabalhos de pesquisa levantados na revisão bibliográfica.

O MR foi determinado tirando-se a média dos resultados de três corpos de prova. Os valores médios de MR apresentados para o teor de projeto variaram entre 5.083 e 6.807 MPa (Tabela 37). No entanto, a análise dos valores de MR é bastante complexa, não devendo ser vista isoladamente. Valores maiores ou menores serão tolerados dependendo das demais camadas que constituem o pavimento como um todo.

O módulo de resiliência é uma medida da rigidez do material. Quanto maior o módulo de resiliência, maior a capacidade de suporte de carga. Como o nome indica, o módulo de resiliência inclui a deformação horizontal recuperável nos cálculos. De acordo com os resultados obtidos, a rigidez do asfalto contendo ARC (agregado reciclado de concreto)

apresentou-se maior no teor de projeto e voltou a diminuir com o aumento no conteúdo de ligante. Comportamento semelhante ao da mistura de referência. No entanto, os resultados de MR (módulo de resiliência) para as misturas híbridas foram um pouco menores que na mistura de referência. Conclui-se que as misturas híbridas têm menores valores de rigidez em relação à mistura de controle. A razão pode ser devido à porosidade existente nos agregados reciclados, tanto em seu interior como na argamassa de baixa resistência aderida às partículas de ARC (agregado reciclado de concreto), que os tornam agregados com menor módulo de elasticidade.

De modo geral, os concretos asfálticos que possuem valores de módulo de resiliência mais elevados são menos compatíveis com bases granulares que os concretos asfálticos que tendem a apresentar menores valores de MR como os preparados com o ligante asfalto-borracha, por exemplo.

5.2.8 Vida de Fadiga

Com a realização do ensaio de vida de fadiga, a intenção foi simular em laboratório o que ocorre em campo, através da relação entre o número de golpes sofridos pelo corpo de prova até o seu rompimento e o número de ciclos dos pneumáticos dos veículos, em campo, até o rompimento da camada do pavimento. Porém, existem diferenças significativas com relação ao tempo e frequência de aplicação da carga, temperatura e valor do módulo de resiliência das camadas constituintes do pavimento, que não podem ser simulados em laboratório. Portanto, os resultados do ensaio de vida de fadiga foram utilizados apenas como mais um meio de comparação entre as misturas aqui estudadas e as pesquisas anteriores. Mesmo nestas comparações, deve-se ter prudência, pois, ao se considerar, por exemplo, que entre misturas, a que possui a curva com maior valor k^{21} será a de maior vida de fadiga, não necessariamente este fato ocorre, pois, a $\Delta\sigma^{22}$ ou σ_t^{23} são diferentes para as misturas. Deve-se verificar se maiores valores de k estão relacionados a maiores módulos de resiliência.

²¹ k é uma constante obtida da regressão linear dos pares N e σ_t ou N e $\Delta\sigma$, determinada nos ensaios em escala logarítmica.

²² $\Delta\sigma$ é a diferença algébrica entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão).

²³ σ_t é a tensão de tração repetida solicitante.

Os ensaios de fadiga foram realizados com corpos de prova moldados há, no máximo, uma semana. No entanto, os valores de resistência à tração utilizados para o cálculo do σ de realização dos ensaios de fadiga foram obtidos em corpos de prova com idade de 6 meses. Se ocorreu aumento na rigidez dos cps durante estes 6 meses, possivelmente este fato interferiu nos resultados tanto de RT quanto de vida de fadiga, pois existe a tendência de enrijecimento das misturas com o tempo, acarretando um incremento nos valores obtidos nos ensaios de RT e MR realizados nestas misturas. Conseqüentemente, os resultados obtidos no ensaio de fadiga podem ser menores que o real.

As médias dos resultados dos ensaios de fadiga são apresentadas na Tabela 38.

Tabela 38 – Vida de fadiga.

Nível de tensão	T _{0%}		T _{25%}		T _{50%}		T _{75%}	
	σ (MPa)	N (ciclos)	σ (MPa)	N (ciclos)	σ (MPa)	N (ciclos)	σ (MPa)	N (ciclos)
50%	3,84	77	3,22	75	3,66	145	3,42	54
40%	3,07	145	2,58	170	2,93	221	2,74	157
30%	2,30	734	1,93	872	2,20	776	2,05	237
20%	1,54	1442	1,29	2030	1,47	1180	1,37	1062

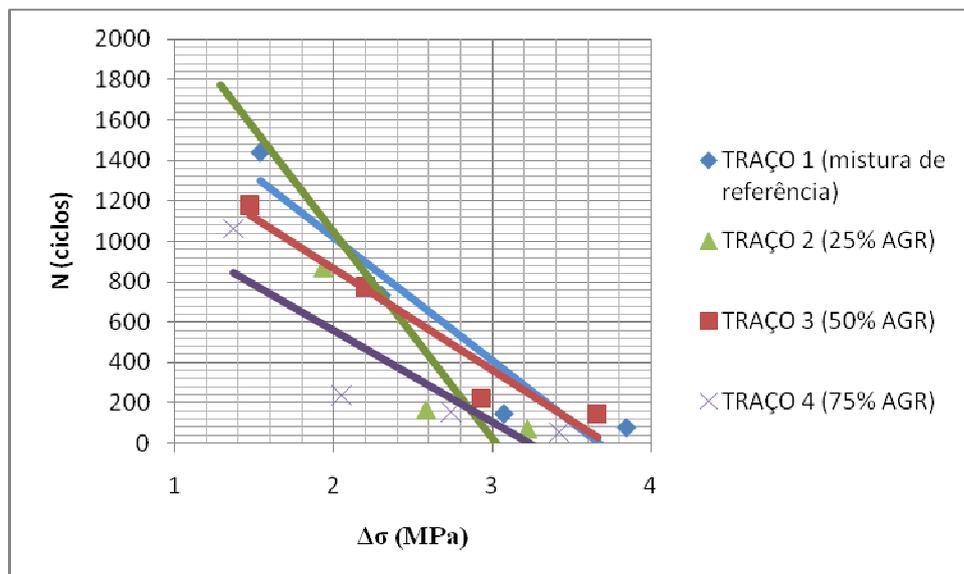


Figura 32 – Vida de Fadiga a tensões controladas.

Pela Figura 32, percebe-se que para tensões mais elevadas, o traço 1 (mistura de referência) e o traço 3 (dosado com 50% de agregado graúdo reciclado) possuem resultados de fadiga bem semelhantes, no entanto, vale ressaltar que se prolongarmos as retas, o traço 2 (dosado com 25% de agregado graúdo reciclado) apresenta comportamento bem superior ao das demais misturas estudadas, tendo em vista que os menores valores de tensão representam mais fielmente o comportamento das misturas em campo.

Conforme demonstrado na Figura 32, os resultados dos ensaios de fadiga apresentaram variações significativas. Foram utilizados apenas três corpos de prova por cada nível de tensão de cada mistura, insuficiente para a análise estatística dos resultados obtidos neste ensaio. Além disto, alguns resultados discrepantes são inconsistentes para embasar qualquer conclusão.

Os corpos de prova Marshall são considerados pequenos para a realização do ensaio de fadiga, principalmente devido ao TMN (tamanho máximo nominal) dos agregados utilizados nas misturas.

O ensaio de fadiga não foi realizado na mistura 5, com 100% de agregado graúdo reciclado, pois este traço não obteve os parâmetros volumétricos determinados pelo método de dosagem Marshall.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Na tentativa de contribuir com o aumento do uso de agregados reciclados de concreto e verificar a viabilidade técnica para emprego nas misturas asfálticas, este trabalho buscou fazer uma avaliação laboratorial do comportamento mecânico da mistura do tipo CBUQ, dosada pelo método Marshall, utilizando-se agregados reciclados (e lavados) de concreto na forma de brita 25 e pedrisco (9,5 mm), substituindo-se o agregado graúdo natural na composição das misturas por agregado reciclado em proporções que variaram entre 0% (mistura de referência), 25%, 50%, 75% e 100%, respeitando-se a composição granulométrica da faixa “B” do DNIT.

Após o trabalho experimental, foi possível concluir que o agregado graúdo reciclado e lavado de concreto comportou-se de forma satisfatória em todos os ensaios determinados pelas normas do DNIT para agregados destinados à pavimentação com CBUQ.

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR) das misturas com agregado reciclado de concreto são da mesma ordem de grandeza para o CBUQ produzido com agregado natural.

A metodologia de dosagem utilizada para as quatro misturas híbridas foi a mesma empregada na mistura de referência e seguiu todos os passos contidos na norma DNER-ME 043/95 para dosagem Marshall. Quando da verificação das propriedades volumétricas, apenas a mistura 5 (dosada com 100% de ARC) não respeitou os parâmetros contidos na norma. Mesmo assim, apresentou resultados de estabilidade, fluência, MR e RT satisfatórios, como as demais misturas híbridas. Os resultados, inclusive, foram bem semelhantes aos da mistura de referência (com 100% de agregado natural).

De modo geral, observou-se a correlação existente entre as propriedades volumétricas e mecânicas do CBUQ e a absorção de água dos agregados que compõem os traços das cinco misturas estudadas.

Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga apresentaram grande dispersão. Este fato dificultou o entendimento, não sendo possível apresentar qualquer tipo de conclusão quanto à durabilidade das misturas estudadas. Porém, a relação MR/RT das misturas híbridas ficou um pouco abaixo da mistura de referência e com valores bem próximos a um estudo anterior

realizado por Ron *et al.* (2008), no qual os pesquisadores comprovaram que a menor relação MR/RT pode ser indicativa de uma maior resistência à fadiga.

Diante da dispersão observada nos resultados de fadiga e mesmo considerando-se os resultados dos ensaios de MR e RT onde tal fato não ocorreu, sugere-se que o número mínimo de corpos de prova para análise das características volumétricas e mecânicas de CBUQ dosados com materiais que ainda estão sendo avaliados tecnicamente seja repensado, visto que apenas três corpos de prova são insuficientes para a análise estatística dos resultados, inviabilizando conclusões mais embasadas.

Com relação ao consumo de ligante, os resultados foram animadores. Diferentemente das pesquisas anteriores (FROTA *et al.*, 2003; PARANAVITHANA; MOHAJERANI, 2006; WONG *et al.*, 2007; RON *et al.*, 2008; SILVA, 2009; MILLS-BEALE; YOU, 2010; PÉREZ *et al.*, 2010), verificou-se que, neste estudo, não ocorreu acréscimo no percentual de ligante das misturas com agregado reciclado. O acréscimo no teor de ligante observado nas pesquisas anteriores pode desestimular o uso deste material, em função do custo elevado do ligante. As misturas híbridas apresentaram teores ótimos de ligante de 5%, semelhantes aos das misturas convencionais e à mistura de referência. Nos estudos anteriores, os pesquisadores adicionaram *filler* às misturas, nesta pesquisa não houve necessidade. Outro fator que pode ter contribuído para este diferencial em relação ao percentual de ligante das demais pesquisas é que, neste estudo, os agregados reciclados foram lavados e levados para secagem em estufa (por, no mínimo, 24h, a temperatura de 110°C) a fim de evitar a presença de pulverulentos e outros tipos de contaminantes. Essa providência foi tomada antes da realização de todos os ensaios.

O uso dos agregados reciclados de concreto não apenas nas camadas de base, sub-base e reforço dos pavimentos, mas também em misturas asfálticas, poderá contribuir para a economia nos custos de pavimentação e aumentar significativamente o consumo dos reciclados. Representando um incentivo aos governos para maiores investimentos na infraestrutura rodoviária.

Como todo material em estudo e ainda sem normas específicas, é precipitado afirmar que os resultados sobre o seu desempenho são conclusivos. A dificuldade maior pode surgir face à heterogeneidade dos agregados reciclados de concreto. A aplicação em campo é imprescindível para que sejam mais bem avaliados. Caso os resultados permaneçam satisfatórios, pode estar surgindo mais uma alternativa viável para a diminuição dos prejuízos

decorrentes do consumo desordenado de matéria-prima, gasto de energia e excesso de resíduos gerados pela cadeia produtiva da construção civil.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Investigar a deformação permanente das misturas estudadas através de ensaios de *creep*;
- Aumentar o número de golpes e grau de compactação das misturas híbridas, pois, o aumento no nível de compactação melhora o módulo de resiliência e a capacidade de propagação de carga;
- Construir pistas de teste com as misturas estudadas para que possa ser feita uma melhor avaliação quanto ao desempenho em serviço, durabilidade, resistência à ação da água e viabilidade técnica e econômica;
- Realizar ensaios acelerados de pavimentos em escala real (*Full-Scale Accelerated Pavement Testing*);
- Investigar, através do ensaio de danos por umidade induzida, o efeito da água nas misturas estudadas, para verificar uma possível influência da elevada porosidade do agregado reciclado de concreto nas misturas asfálticas. Com este ensaio é possível verificar ainda se ocorrerá um problema futuro de adesividade ligante-agregado;
- Realizar o ensaio desgaste Cântabro para ajudar a prever patologias dos revestimentos asfálticos, quanto à perda de agregados da capa de rolamento do pavimento, através do atrito entre o pneu e o pavimento. Este ensaio é mais comumente utilizado em misturas drenantes (camada porosa de atrito – CPA), no entanto, devido à porosidade do agregado reciclado de concreto, também pode ser interessante para as misturas híbridas.
- Os agregados reciclados possuem alta taxa de absorção quando comparados ao agregado natural, tal fato pode contribuir para aumentar a perda dos componentes oleosos do ligante e consequentemente acelerar o envelhecimento das misturas. No entanto, esta é apenas uma suposição, sendo aconselhável que novos estudos verifiquem o envelhecimento a longo prazo das misturas com estes agregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACC - ASSOCIATION CANADIENNE DE LA CONSTRUCTION. **Guide des meilleures pratiques en matière de réduction des déchets solides**. Document normalisé de construction – 81. 2001.

AFFONSO, F. J. A. **Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos**. Dissertação (Mestrado). 2005. p.161. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2010**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=31286>.

AGOPYAN, V.; JONH, V. **Reciclagem de Resíduos da Construção**. In: SEMINÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS. **Anais**. São Paulo, 2000.

_____. **Reciclagem de Resíduos da Construção**. In: SEMINÁRIO DE RESÍDUOS DOMICILIARES. **Anais**. São Paulo, 2003.

ALDIGUERI, D. R.; SILVEIRA, M. A.; SOARES, J. B. (2001). **Estudo comparativo entre compactação manual e automática de misturas asfálticas**. 33^a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis, v.I, p. 804-813.

ALJASSAR, A.H.; AL-FADALA, K.B. **Recycling building demolition waste in hot-mix asphalt concrete: a case study in Kuwait**, J Mater Cycle Waste Manage 7 (2) (2005), pp. 112–115.

ALTERNATIVE MATERIALS IN ROAD CONSTRUCTION. 1999. **Literature Review – Volume 1**. Disponível em: <<http://www.trl.co.uk/altmat/index.htm>>. Acesso em: 10 de dez. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures**. D 4867 – 96. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 5p. 1996.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

_____. **Normalização dos Agregados Graúdos de Resíduos de construção civil de Reciclados para Concretos e a Variabilidade**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Florianópolis, 2002. **Anais**. Santa Catarina, 2002. p. 1613 – 1624.

ANGULO, S. C. et al. **Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição**. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A

RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 6, 2003, São Paulo. **Anais: IBRACON/IPEN**. 2003.

ARAÚJO JR., E. L. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Agregados Reciclados de Resíduos de construção civil em Obras de Pavimentação**. Relatório de Iniciação Científica, PIBIC Facepe/UPE, 2007, p. 27.

ASPHALT INSTITUTE. **Manual do Asfalto**. Lexington, Manual Series N° 4 (MS-4), Traduzido pela Petrobrás. 1989. 599p.

ASPHALT INSTITUTE. **Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types**. Lexington, Manual Series N° 2 (MS-2), 6ª ed. 1995a. 141p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). **NBR 15115/04 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação** – Procedimentos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

_____. (2004). **NBR 15116/04 – Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos de Construção Civil – Utilização em Pavimentação e Preparo de Concreto sem Função Estrutural** - Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

_____. (1984). **NBR 7181/84 – Análise Granulométrica; Método de Ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

_____. (2009). **NBR 7211/2009 – Agregados para concreto; Especificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BEEL, C.A. **A Summary Report on Aging of Asphalt-Aggregate Systems**. Report SR-OSU-A-003A-89-2. Oregon State University, 1989.

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**, n.1714, p.33-39, 2000.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 1ª ed., Rio de Janeiro, RJ, 2007.

BLANKENAGEL, B. J.; GUTHRIE, W. S. Laboratory characterization of recycled concrete for use as pavement base material. **Transportation Research Record**, Washington, n.1952, p.21-27, 2006.

BODI, J.; BRITO FILHO, J. A.; ALMEIDA, S. (1995). **Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana**. In: Anais da 25ª RAPv, Rio de Janeiro, ABPv, p. 409-436.

BOILEAU, H.; LACHAMBRE, V.; ACHARD, G. **Waste on new building construction sites: existing situation and proposals for a better management**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., Paris, 1997. **Proceedings**. Paris, CSTB, 1997. v.1, p.717-24.

BROWN, E. R.; KANDHAL, P. S.; ZHANG, J. **Performance testing for hot mix asphalt**. NCAT – National Center for Asphalt Technology. Auburn, report n. 2001-5. 2001.

BROWN, E. R.; CROSS, S. A. **A national study in hot mix asphalt (HMA) pavements**. Journal of Association of Asphalt Pavement Technologists. v.62, p. 535-582.1992.

CABRAL, G. da L. L. (2005) **Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação** (dissertação de Mestrado). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.

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

CASTRO NETO, A. M., 2000, **Proposta de projeto de dosagem de concreto betuminoso reciclado a quente**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

CHEN, M.; LIN, J.; WU, S. (2011). **Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture**. Construct Build Mater (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: 19 de out. 2010.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (2006). **Relatório Gerencial. Pesquisa Rodoviária 2006**. CNT, SEST, SENAT. 157p.

_____ (2009), **Plano CNT de transporte e logística 2009**. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/index.aspx>

_____ (2011), **Plano CNT de transporte e logística 2011**. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/index.aspx>

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE nº 307/2002 – “**Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**” – Data da legislação: 05/07/2002 – Publicação DOU nº 136, 17/07/2002, págs. 95-96.

COPPEAD – INSTITUTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO DE EMPRESAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2007. Disponível em: <http://coppead.ufrj.br>

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2004**. Brasília. 2004. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2004/AGREGADOS%20PARA%20CONSTRU%C7%C3O%20CIVIL%202004.pdf>>.

_____. **Sumário Mineral 2007**. Brasília. 2004. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/98 – Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 06 p.

_____. **DNER-ME 043/95 – Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 11p.

_____. **DNER-ME 053/94 – Misturas betuminosas – percentagem de betume**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 05 p.

_____. **DNER-ME 054/97 – Equivalente de areia**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 10 p.

_____. **DNER-ME 078/94 – Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 03 p.

_____. **DNER-ME 081/98 – Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 06 p.

_____. **DNER-ME 083/98 – Agregados – análise granulométrica**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 05 p.

_____. **DNER-ME 084/95 – Agregado miúdo – determinação da densidade real**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 06 p.

_____. **DNER-ME 086/94 – Determinação do índice de forma do agregado**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 05 p.

_____. **DNER-ME 089/94 – Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 06 p.

_____. **DNER-ME 133/94 – Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, 1994. 5p.

_____. **DNER-ME 138/94 – Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, 1994. 4p.

_____. **DNER-ES 313/97 – Pavimentação – concreto betuminoso**; Especificação de Serviço, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 16 p.

_____. **DNER-ME 397/99 – Agregados – determinação do índice de degradação Washington – ID_w**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 06 p.

_____. **DNER-ME 399/99 – Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton**; Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 05 p.

_____. **Manual de pavimentação**, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, 2ªed., 1996, 320p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico** – especificação de serviço. DNIT 031/2006 – ES. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro, 2004**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/>

_____. **Anuário Mineral Brasileiro, 2006**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/>

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

DORSTHORST, B. J. H.; HENDRIKS, CH. F. Re-use of construction and demolition waste in the EU. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 9p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. Brasília. 2000. **Anuário estatístico dos transportes**. Disponível em: <<http://www.geipot.gov.br/NovaWeb/IndexAnuario.htm>>. Acesso em: 27 de nov. 2010.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Characterization of building-related construction and demolition debris in the United States**. United States, 1998. 100p. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/sqg/c&d-rpt.pdf>>

EUROPEAN COMMISSION (EC). 1999. **Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts – Final Report**. Disponível em: <http://europa.eu.int/comm/environment/waste/studies/cdw/c&dw_report.htm>. Acesso em: 29 de nov. 2010.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **Management of construction and demolition waste**. 2000. Disponível em:

<http://ec.europa.eu/enterprise/environment/index_home/waste_management/constr_dem_waste_000404.pdf>

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **FHWA-RD-97-148**: User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction. Department of Transportation. Washington, 1997. Disponível em: <<http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/begin.htm>>. Acesso em: 02 de fev. 2010.

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. 109p. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ). Rio de Janeiro, 2004.

FREEMAN, L. A.; HARDER, M. K. **Environmental impact of transportation during the transfer and disposal of construction and demolition waste to landfill**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., Paris, 1997. **Proceedings**, Paris, CSTB, 1997. v.1, p.707-715.

FROTA, C. A.; ALENCAR, C. L. S., SILVA, C. P. L. **Influência do tipo de agregado na qualidade técnica de misturas asfálticas (2004)**. In: 35ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Rio de Janeiro, 2004. **Anais**. Rio de Janeiro, RAPv, 2004. p. 11.

FROTA, C. A.; MELO, D. M.; NUNES, F. R. G. **Análise da Influência da Capacidade de Absorção do Resíduo Processado da Construção Civil na Determinação de Índices Físicos de Misturas Asfálticas (2005)**. In: 36ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Curitiba, 2005. **Anais**. Paraná, RAPv, 2005.

FROTA, C. A.; MELO, D. M.; NUNES, F. R. G. **Análise do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduo Processado da Construção Civil (2006)**. In: V JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE PAVIMENTOS: POLÍTICAS E TECNOLOGIAS, Recife, 2006. **Anais**. Pernambuco, 2006.

FROTA, C. A.; MELO, D. M.; SILVA, C. L.; D'ANTONA D. M.; NUNES, F. R. G.; SANTOS, M. G. R. – **Estudo da Resistência à Tração de Misturas Confeccionadas com Agregados Reciclados**. In: CONGRESSO DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, São Paulo, 2007. **Anais**. São Paulo, CONINFRA, 2007.

FROTA, C. A.; SILVA C. P. L. **Estudo de Misturas Betuminosas com Entulho Reciclado Fracionado E Não-Fracionado (2004)**. In: 35ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Rio de Janeiro, 2004. **Anais**. Rio de Janeiro, RAPv, 2004. p. 10.

GEIPOT – EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DOS TRANSPORTES. **Anuário Estatístico dos Transportes, 2000**. Disponível em: <http://www.geipot.gov.br>.

GOETZ, W. H. **The evolution of asphalt concrete mix design**. ASTM STP 1041, 1989.

GOUVEIA, L. T.; FURLAN, A. P.; PARREIRA, A. B.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; FABBRI, G. T. P. **Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade**. Departamento de Transportes – Escola de

Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. XVIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004.

GRECO, J.A.S. **Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos.** São Carlos, 2004. Tese (Doutorado) – Departamento de Estradas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GUANDALINI, G. **Buracos que envolvem vidas e lucros.** Veja, São Paulo, edição 2020, ano 40, n.31, p. 88-89, 8 ago. 2007. Editora Abril.

GUERRA, J. S.; GUSMÃO, A. D.; SUKAR, S. F.; SIQUEIRA, M. S. **Avaliação da Gestão de Resíduos de Construção de Edifícios na Cidade do Recife.** In: XII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Fortaleza, 2008. **Anais.** Ceará, 2008.

GUIMARÃES, R. C.; RIBEIRO, H. C. **Utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em revestimentos asfálticos.** Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológica Engenharia Civil. Anápolis, GO, 2005.

GÜNTHER, W. M. R. **Minimização de resíduos e educação ambiental.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, 7. Curitiba, 2000. **Anais.** Curitiba, 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.

HILL, A. R.; DAWSON, A. R.; MUNDY, M. **Utilization of aggregate materials in road construction and bulk fill.** Journal of Resources, Conservation & Recycling, v.32, p.305-320, 2001.

HISLOP, W.P.; COREE, B.J. (2000) **VMA as a Design Parameter in Hot-Mix Asphalt.** Mid-Continent Transportation Symposium Proceedings, p. 24-29.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2007. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>

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

KANDHAL, P. S.; MALLIK R. B. (1997) Longitudinal Joint Construction techniques for asphalt pavements, National Center for Asphalt Technology Report, nº 97 – 04, august, 1997.

KULAIIF, Y. **Análise dos mercados de matérias-primas minerais: estudo de caso da indústria e pedras britadas do Estado de SP.** 2001. 144p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

KUO, S.; MAHGOUB, H. S.; ORTEGA, J. E. **Use of recycled concrete made with Florida limestone aggregate for a base course in flexible pavement.** Final Report, Florida Department of Transportation. Orlando, Florida, 2001.

KUO, S.; MAHGOUB, H. S.; NAZEF, A. Investigation of recycled concrete made with limestone aggregate for a base course in flexible pavement. **Transportation Research Record**, Washington, n.1787, p.99-108, 2002.

LEE, D. Y.; GUINN, J. A.; KANDHAL P. S.; DUNNING, R. L. **Absorption of asphalt into porous aggregates.** Report SHRP-A/UIR – 90-009. National Research Council, DC, p.1-29, 1990.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Porto Alegre, 2001. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Porto Alegre. UFRGS.

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

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

_____ (2001). **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

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**, 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. 240p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

LIMA, A. T. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente.** Fortaleza, 2003. Dissertação (Mestrado), PETRAN, Universidade Federal do Ceará.

LOPES, M. M. **Diagnóstico da geração de resíduos da construção e demolição pelos grandes geradores do município de Fortaleza.** Fortaleza, 2007. Monografia (Graduação), Universidade Federal do Ceará.

LUND, H. F. **The McGraw-Hill recycling handbook**. New York: McGraw- Hill, 1993. Cap.20., p.20.1-20.20.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de minérios**. 4ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004. 867p.

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

MILLS-BEALE, J.; YOU, Z. **The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates**. *Construction and Building Materials*, v. 24, p.230-235, 2010.

MIRANDA, L. F. R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil**. São Paulo, 2005. 441p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. **A reciclagem de resíduos de construção civil 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.

MOMBER, A.W. The fragmentation of cementitious composites in a jaw breaker. **Theoretical and applied fracture mechanics**, Elsevier. 38, p.151-164. 2002.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. São Paulo, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 258p.

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

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

NATAATMADJA, A.; TAN, Y. L. Resilient response of recycled concrete road aggregates. **Journal of Transportation Engineering**. Reston, Virginia, v.127, n.5, p.450-453, 2001. Disponível em:
<<http://ascelibrary.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JTPEDI0012700000500045000001&idtype=cvips>>.

NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Construction uses of lime**. Disponível em: http://www.lime.org/uses_of_lime/construction/asphalt.asp. Acessado em mai-2011.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. São Carlos, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 251p.

OGURTSOVA, J.; BIRMAN S.; COELHO V. **Concreto Asfáltico**. DER Paraná, Curitiba, PR. 2º ed. 1999, 151p.

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.

PARANAVITHANA, S.; MOHAJERANI, A. **Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete**. *Resour Conserv Recycl* 48 (1) (2006); p. 1-12.

PÉREZ, I.; TOLEDANO, M.; GALLEGU, J.; TAIBO, J. **Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed constructions and demolition debris**, *Mater Construcc* 57 (285) (2007), p. 17–29.

PÉREZ, I.; TOLEDANO, M.; GALLEGU, J.; TAIBO, J. **Asphalt mixtures with construction and demolition debris**, *Proc Inst Civil Eng: Trans* 163 (4) (2010), p. 165–174.

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

POON, C. S. Management and recycling of demolition waste in Hong Kong. **Waste Management and Research**, v. 15, 561-572, 1997.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **PMSP/SP ETS-001: Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. Secretaria de Infra-estrutura Urbana, Especificação Técnica de Serviço, São Paulo, 2003. Disponível em: http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/infraestruturaurbana/normas_tecnicas_de_pavimentacao/pmspets0012003.pdf.

QUEBAUD, M. **Caracterisation des granulats recycles etude de la composition et du comportement de betons incluant ces granulats**. França, 1996. 247p. Tese (Doutorado) - Universidade d'Artois.

REID, J. M. (2000). **The use of alternative materials in road construction**. UNBARS Conference, United Kingdom, 2000. Disponível em: <http://www.trl.co.uk/altmat/ALT-MAT%20final%20rev1.dot>.

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

ROHDE, L. (2007). **Estudo das misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS. 250p.

RON, Marta Baragaño; CASAGRANDE, Michéle Dal Toé; DO VALE, Aline Colares; LOPES, Manuela de Mesquita; SOARES, Jorge Barbosa. **Aplicabilidade de Resíduos Reciclados da Construção Civil e Demolição Como Agregados em Misturas Asfálticas** (2008). (In): 15ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, Salvador, 2008. **Anais**. Bahia, RPU, 2008. p. 9.

RUCH, M.; SCHULTMANN, F.; SINDT, V.; RENTZ, O. **Strategies for the quality improvement of recycling materials**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., Paris, 1997. **Proceedings**, Paris, CSTB, 1997. v.1, p. 611-18.

SAED, A. **Performance-related tests of recycled concrete aggregates for use in unbound pavement layers**. NCHRP Report 598. Transportation Research Board of the National Academies; 2008. p. 1-53.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de argilas: Aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1975. v.2.

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

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

SHEN, D. H.; DU, J. C. **Evaluation of building materials recycling on HMA permanent deformation**. *Construct Build Mater* **18** (6) (2004), p. 391–397.

SHEN, D. H.; DU, J. C. **Application of gray relational analysis to evaluate HMA with reclaimed building materials**. *J Mater Civ Eng* **17**(4) (2005), P. 400-6.

SILVA, B. T. A.; SILVA, M. G. B.; BARROSO, S. H. A. (2008) **Avaliação da energia de compactação no desempenho de mistura produzida a partir de agregados reciclados para emprego em camadas granulares dos pavimentos**. Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Disponível em: <http://www.uninorte.edu.co/panam2008/CDPANAM/pdfs/I_008.pdf>

SILVA, C. A. R. (2009) **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas**. Ouro Preto/MG, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – NUGEO/UFOP. 220p.

SILVA, P. D. (2001) **Estudo do reforço de concreto de cimento Portland (whitetopping) na pista circular experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias**. Rio de Janeiro, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ. 358p.

SINDUSCON-SP (2005). **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil – A experiência do SINDUSCON-SP**. São Paulo, 2005. Disponível em:

<http://www.sindusconsp.com.br>.

SJÖSTRÖM, C. Durability of building materials and components. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 9p.

SOARES, J.B.; F.A.C. FREITAS; J.V.C. BRANCO e L.M.G. MOTTA, 2000, **Método de previsão do teor ótimo de ligante em misturas asfálticas tipo CBUQ**. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, Associação Brasileira de Pavimentação, v. 1, p. 149- 162.

SOBHAN, K.; MASHNAD, M. Fatigue damage in roller-compacted pavement foundation with recycled aggregate and waste plastic strips. **Transportation Research Record**, Washington, n.1798, p.8-16, 2002.

SPECHT, L. P. (2004) **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Porto Alegre. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS. 279p.

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.

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, SIDNEY. Sidney (1999). **Recycled construction and demolition materials for use in roadworks and other local government activities**. Disponível em:
http://www.ipwea.org.au/upload/final_scoping_report.pdf.

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias**. Fortaleza, 2004. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. 149p.

VON QUINTUS, H. L.; SCHEROCMAM J.; HUGES C. Asphalt-aggregate mixtures analysis system: philosophy of the concept. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. Philadelphia: William Garter Jr., Ed., ASTM STP 1041. p.15-38. 1989.

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

WONG, Y. D.; SUN, D. D.; LAI, D. **Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt**. Waste Manage 27 (2) (2007); p. 294-301.

ZORDAN, S. E. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

ZWAN, J. T. **Application of waste materials – a success now, a success in the future.** In: Waste materials in constructions: putting theory into practice. Great Britain, 1997. Proceedings. Great Britain, 1997. p. 869-81.