

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL - PPGECC

ADRIANA VERCHAI DE LIMA LOBO

**AVALIAÇÃO DO USO DE AGREGADOS MIÚDOS  
RECICLADOS DE CONCRETO EM CONCRETOS  
BETUMINOSOS USINADOS A QUENTE**

**CURITIBA**

**2013**

**ADRIANA VERCHAI DE LIMA LOBO**

**AVALIAÇÃO DO USO DE AGREGADOS MIÚDOS  
RECICLADOS DE CONCRETO EM CONCRETOS  
BETUMINOSOS USINADOS A QUENTE**

Dissertação de Mestrado em Engenharia da Construção Civil, submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia da Construção Civil com área de concentração em Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo F. R. Miranda.

Co-orientador: Prof. MEng. Djalma R. Al Chueyr M. Pereira

**CURITIBA**

**2013**

Lobo, Adriana Verchai de Lima

Avaliação do uso de agregados miúdos reciclados de concreto em concretos betuminosos usinados a quente / Adriana Verchai de Lima Lobo. – Curitiba, 2013.

158 f. : il.; graf., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil

Orientador: Leonardo F. R. Miranda

Coorientador: Djalma R. Al Chueyr M. Pereira

1. Pavimentos de asfalto. 2. Concreto - Pavimentos de betume.  
I. Miranda, Leonardo Fagundes Rosemback. II. Pereira, Djalma Rocha Al-Chueyr Martins. III. Título.

CDD 625.85

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

ADRIANA VERCHAI DE LIMA LOBO

### **AVALIAÇÃO DO USO DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO EM CONCRETOS BETUMINOSOS USINADOS A QUENTE**

Dissertação aprovada como requisito à obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Construção Civil do setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, área de concentração em Materiais, pela comissão formada pelos professores:

---

Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosemback Miranda  
Orientador  
Departamento de Construção Civil, UFPR

---

Prof. Msc.Eng. Djalma R. Al Chueyr M. Pereira  
Co-orientador  
Departamento de Transportes, UFPR

---

Prof. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci  
Departamento de Engenharia de Transportes, USP

---

Prof. Dr. Marcelo Henrique Faria de Medeiros  
Departamento de Construção Civil, UFPR

Curitiba, 29 de maio de 2013.

*A minha avó Irene Verchai (in memoriam), a mulher mais corajosa e vencedora que conheci, aos meus filhos Victor Henrique e Manuela, e ao meu esposo Marcio, meus amores!*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por tudo que sou e pelas bênçãos já concedidas, são muito mais do que eu podia imaginar para a minha vida.

Ao meu esposo Marcio pelo amor, ajuda, carinho e admiração, também pela compreensão da minha ausência em tantos momentos, você é o homem da minha vida! Aos meus filhos Victor Henrique e Manuela, meus maiores projetos, amo vocês!

Em especial a Dra. Carmem, pelo apoio e incentivo durante todo o Mestrado.

Aos meus pais, Celso e Miraci, por me darem a vida e por todo amor que tenho por eles e também às minhas irmãs, Andréa e Andressa, minhas primeiras companheiras, confidentes e amigas eternas, família é porto seguro!

Aos meus sogros Antônio Augusto e Irene pelo apoio incondicional cuidando dos meus filhos para que eu pudesse estudar, sem ajuda de vocês isto não seria possível.

Aos padrinhos da minha filha Eduardo e Andressa pelas palavras de incentivo e também por cuidarem da Manuela enquanto a mamãe dela estava estudando.

Ao Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda, meu orientador, pela oportunidade, paciência, interesse, conselhos e dedicação. Pela responsabilidade, critério e competência com que conduziu este trabalho.

Ao Prof. M.Sc. Djalma R. Al Chueyr M. Pereira, co-orientador, pelo apoio, orientações e pela viabilização de alguns ensaios.

À Universidade Federal do Paraná, lugar especial, pois além de ter sido local de trabalho dos meus avós paternos Jandiro (*in memorian*) e Irene (*in memorian*) é também meu berço profissional, 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, como tenho plena consciência que devo contribuir de alguma maneira pelo desenvolvimento do meu País.

À Profa. Dra. Liedi Bernucci e ao Prof. Dr. Edson Moura do EPUSP/LTP, por abrirem as portas do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da USP para o Ensaio de Deformação Permanente, pelas sugestões na condução do trabalho e

pela acolhida e apoio incondicionais, disponibilizando o LTP e toda a sua equipe de alunos e técnicos quando estive em São Paulo para a realização dos ensaios.

À toda a equipe do LTP/USP, em especial à Diomaria pelo carinho e simpatia e ao Erasmo pela dedicação e ajuda nos trabalhos pesados

Ao Prof. Dr. Jorge Barbosa da UFC, pela orientação e participação da minha qualificação.

Aos alunos e engenheiros, alguns já professores, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil da UFPR, em especial a Janaína Settin Motter, minha companheira durante quase todo o programa, Maria Izabel Goto Zanlorenzi a pessoa que me deu a ótima notícia que havia sido aprovada no processo seletivo do Mestrado, Isabela Oliveira, Eduardo Pereira, Luana Scheiffer, Alécio Mattana, Andressa Gobbi, Carlos Gustavo Marcondes, Manoela Kerber, Gilberto Coelho, Karoline Richter e tantos outros pelas ajudas, dúvidas, inseguranças, conselhos, incentivos compartilhados. A companhia de vocês disfarçou as dificuldades proporcionando momentos de descontração e uma grata convivência.

À Ziza, secretária do PPGEEC/UFPR, pela sua simpatia, humildade e dedicação ao programa.

As empresas Megapav, Supermix, Engefoto (técnico Luiz Reginaldo), pela doação de materiais e a empresa Afirma nas pessoas da Engenheira Química Giovanna Gutierrez e dos técnicos Gerson e Letícia, pela iniciação da equipe do LAMP nos ensaios de CAP e de CBUQ.

À toda equipe do LACTEC-UFPR, em especial aos Engenheiros Marcel Luiz Escobedo e Jéferson Luiz Bronholo.

Aos alunos de iniciação científica e bolsistas: César Frandaloso, Cátia Graeff, Luiz Calhau, Fabiano Tomazin, Murilo Prado, por toda a ajuda e dedicação a execução dos ensaios.

Às minhas amigas Susan Kelly Jacomel, Renata Araujo, Tathiana Grinberg, Patrícia Munhoz e Silva pelo incentivo e paciência em estarem comigo mesmo quando o Mestrado era meu principal assunto.

Aos meus colegas de trabalho que acompanharam e de certa forma também me ajudaram, são tantos que não vou escrever nomes para não correr o

risco de esquecer alguém, pois para mim o trabalho é bênção e também minha segunda casa.

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

## RESUMO

LOBO, A. V. L. Avaliação do uso de agregados miúdos reciclados de concreto em concretos betuminosos usinados a quente. 2013. 158p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

O futuro da pavimentação inevitavelmente envolverá o uso de materiais reciclados. Esta tendência de sustentabilidade é devido ao impacto ambiental positivo que agregados reciclados têm quando utilizados em pavimentação devido à grande demanda de agregados para este tipo de construção. Os agregados reciclados podem ser utilizados em misturas asfálticas como revestimento ou em bases e sub-bases. O objetivo desta pesquisa é avaliar o uso do agregado reciclado de concreto miúdo (ARCM) em CBUQ em substituição ao pó de pedra. Para isto, foram obtidas duas amostras de ARCM a partir da moagem de corpos de prova de concreto obtidos em concreteira, com duas diferentes classes de resistência 20 MPa e 40 MPa. Além disso, foram utilizados brita e pó de pedra proveniente da britagem de rocha calcária. Todos estes materiais foram caracterizados quanto às propriedades físicas e mecânicas. Então as frações miúdas de pó de pedra e ARCM foram misturadas nas seguintes proporções de ARCM: 0% (referência), 50% para as duas classes do concreto origem (20 e 40MPa) e 100% para as duas classes do concreto origem (20 e 40MPa), sendo que a fração graúda foi sempre composta de brita de origem calcária. As cinco composições de agregado miúdo foram misturadas com pedrisco e brita, mantendo-se constante a curva granulométrica conforme definido pelo DNIT e enquadradas na faixa C. Para a moldagem de corpos de prova de concreto asfáltico conforme a metodologia Marshall, foi utilizado o ligante CAP 50/70, o qual caracterizado conforme requisitos exigidos por normas brasileiras. A caracterização mecânica das misturas foi realizada através dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), determinação do dano por umidade induzida (RRT) e deformação permanente. Os ARCM, apesar de possuírem elevada absorção e elevado teor de finos < 0,075 mm, apresentaram características satisfatórias que se enquadraram nas especificações do DNIT para emprego em concretos asfálticos. Os resultados volumétricos obtidos ficaram dentro dos limites mínimos estabelecidos pelas normas do DNIT, foram satisfatórios também os resultados quanto à deformação permanente, módulo de resiliência, resistência à tração e dano por umidade induzida, indicando uma possível viabilidade técnica para execução de concretos asfálticos em vias de baixo e médio tráfego com o aproveitamento destes resíduos, de maneira a contribuir para a minimização dos problemas relacionados à disposição final.

**Palavras-chave:** agregado reciclado de concreto, RCD, ARC, resíduos de construção civil, reciclagem, CBUQ, pavimentação, concreto asfáltico.

## ABSTRACT

LOBO, A. V. L. Evaluation on the use of recycled fine concrete aggregates (RFCA) in hot mix asphalt concrete (HTMA). 2013. 158p. Essay (Master's degree) Postgraduate program in Civil Engineering, Federal University of Paraná, Curitiba, 2013.

The future of paving will inevitably involve the use of recycled materials. This tendency to sustainability is due to the positive environmental impact that recycled aggregates have when used in paving, due to the great demand of those in this type of construction. The recycled aggregates can be used in asphalt mixes as coatings or in bases and sub bases. The objective of this research is to evaluate the use of recycled fine concrete aggregate (RFCA) in HTMA, replacing rock dust. For this, two samples of RFAC were obtained from the grinding of concrete specimens bodies obtained in a concrete plant with two different categories of resistance 20 MPa and 40 MPa. Furthermore, gravel and rock dust from the crushing of limestone were used. All these materials were characterized by its physical and mechanical properties. Then the fine dust fractions of stone dust and fine RFCA were mixed in the following proportions of RFCA: 0% (reference), 50% for the two categories of the concrete source (20 and 40MPa) and 100% for the two categories of the concrete source (20 and 40MPa), being the coarse fraction always composed of limestone of calcareous origin. The five compositions of fine aggregate were mixed with gravel and grit, maintaining themselves constant to the granulometric curve as defined by the National Department of Infrastructure of Transport (DNIT) and fixed as band C. For the molding of specimen bodies of asphalt concrete, according to Marshall's methodology, a ligand CAP 50/70 was used, which was characterized according to the requirements demanded by Brazilian standards. The mechanical characterization of the mixtures was performed through endurance tests to the static traction by diametrical compression (DC), modulus of resilience (MR), determination of moisture induced damage and permanent deformation. The RFCA, despite having high absorption and high content of fines <0.075 mm, showed satisfactory characteristics that met the specifications of the National Department of Infrastructure of Transport (DNIT), for the use in asphalt concrete. The volumetric results obtained stayed within the minimum limits established by DNIT regulations and the results regarding permanent deformation, modulus of resilience and determination of moisture induced damage were also satisfactory, which indicates a possible technical viability to execute asphalt concrete in low and medium traffic zones, making the most of these residues, in order to contribute to the minimization of problems related to final disposition.

Keywords: recycled concrete aggregate (RCA), Construction and demolition (C&D) waste, recycling, HTMA, paving, asphalt concrete.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: REDE DO SNV TOTAL (DNIT, 2013). .....	6
FIGURA 2: COMPARAÇÃO DE EXTENSÕES NÃO PAVIMENTADAS E PAVIMENTADAS NAS UNIDADES DA FEDERAÇÃO (DNIT, 2013). .....	7
FIGURA 3: BRITADOR TIPO MANDÍBULA.....	67
FIGURA 4: CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS.....	68
FIGURA 5: GRANULOMETRIA DOS TRAÇOS ENQUADRADOS NA FAIXA C DNIT. ....	75
FIGURA 6: TEMPERATURA LIGANTE.....	77
FIGURA 7: CURVA VISCOSIDADE X TEMPERATURA.....	78
FIGURA 8: COMPACTADOR MARSHALL.....	79
FIGURA 9: CORPOS DE PROVA.....	80
FIGURA 10: EQUIPAMENTO RICE TEST. ....	82
FIGURA 11: BANHO-MARIA CORPOS DE PROVA.....	84
FIGURA 12: PRENSA MARSHALL.....	84
FIGURA 13: AFUNDAMENTO TRILHA DE RODA (FONTE: DNIT 005/2003-TR). ....	86
FIGURA 14: MISTURADOR MECÂNICO. ....	87
FIGURA 15: MESA COMPACTADORA.....	87
FIGURA 16: SIMULADOR DE TRÁFEGO TIPO LP.....	88
FIGURA 17: PLACAS APÓS ENSAIO NO SIMULADOR.....	88
FIGURA 18: VOLUME DE VAZIOS X TEOR DE LIGANTE. ....	97
FIGURA 19: RELAÇÃO BETUME / VAZIOS X TEOR DE LIGANTE. ....	97
FIGURA 20: VAZIOS DO AGREGADO MINERAL (VAM) X TEOR DE LIGANTE.....	98
FIGURA 21: MASSA ESPECÍFICA APARENTE (GMB) X TEOR DE LIGANTE. ....	99
FIGURA 22: MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA MEDIDA (DMM). ....	99
FIGURA 23: ESTABILIDADE X TEOR DE LIGANTE.....	100
FIGURA 24: DEFORMAÇÃO PERMANENTE AN.....	101
FIGURA 25: DEFORMAÇÃO PERMANENTE A20M50. ....	102
FIGURA 26: DEFORMAÇÃO PERMANENTE A20M100. ....	103
FIGURA 27: DEFORMAÇÃO PERMANENTE A40M50. ....	104
FIGURA 28: DEFORMAÇÃO PERMANENTE A40M100. ....	104
FIGURA 29: RESULTADOS DEFORMAÇÃO PERMANENTE DAS MISTURAS. ....	105
FIGURA 30: RESULTADOS RT AN, A40M50 E A40M100. ....	107
FIGURA 31: RESULTADOS MR DAS MISTURAS.....	108
FIGURA 32: RESULTADOS MR/RT AN, A40M50 E A40M100. ....	109
FIGURA 33: ASPECTO DO PLANO DE RUPTURA APÓS ENSAIO RRT NA MISTURA A40M100.....	110

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (JOHN E AGOPYAN, 2000) .....	10
TABELA 2: PRODUÇÃO DE RCD EM ALGUMAS CIDADES BRASILEIRAS (AFFONSO, 2005) .....	10
TABELA 3: CLASSIFICAÇÃO DOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS DE ACORDO COM A GERAÇÃO DE RCD PELA POPULAÇÃO URBANA (JOHN; AGOPYAN, 2000) .....	11
TABELA 4: EXEMPLOS DE USINAS DE RECICLAGEM IMPLANTADAS NO BRASIL ATÉ NOVEMBRO DE 2008 (MIRANDA ET AL., 2009) .....	11
TABELA 5: COMPOSIÇÃO DE RCD NO BRASIL (SILVA, 2009).....	12
TABELA 6: MUNICÍPIOS NO BRASIL COM SERVIÇO DE MANEJO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL POR REGIÃO (SNIS, 2010) .....	13
TABELA 7: MUNICÍPIOS NO BRASIL COM SERVIÇO DE MANEJO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL POR REGIÃO (SNIS, 2010) .....	13
TABELA 8: INSTRUMENTOS LEGAIS E NORMATIVOS DE ABRANGÊNCIA NACIONAL .....	14
TABELA 9: ESTADOS COM POLÍTICA ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS,2010).....	18
TABELA 10: RESULTADOS DE PROPRIEDADES DE ARC EM PESQUISAS .....	28
TABELA 11: ENSAIOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS - LIMITES PARA ACEITAÇÃO DE AGREGADOS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO .....	37
TABELA 12: PROPRIEDADES PARA AGREGADOS UTILIZADOS EM CBUQ PELA NORMA EUROPEIA BS EN 13043 (BIRD, 2007) .....	38
TABELA 13: RESULTADOS E NORMAS INTERNACIONAIS PARA ARC (WEN E BHUSAL, 2011) .....	38
TABELA 14: ENSAIOS NACIONAIS PARA DETERMINAÇÃO DE TENACIDADE E RESISTÊNCIA À ABRASÃO (BERNUCCI <i>ET AL.</i> 2007) .....	39
TABELA 15: RESULTADOS DE PESQUISAS UTILIZANDO RCD EM CBUQ (WEN E BHUSAL, 2011) .....	47
TABELA 16: DENOMINAÇÃO DOS AGREGADOS E TRAÇOS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	67
TABELA 17: ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS NA PESQUISA .....	68
TABELA 18: GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS - % PASSANTE .....	69
TABELA 19: RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS .....	69
TABELA 20: MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE FINOS < 75 µM DOS AGREGADOS MIÚDOS .....	69
TABELA 21: RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CAP 50/70.....	70
TABELA 22: MASSA ESPECÍFICA APARENTE AGREGADO MIÚDO .....	71
TABELA 23: TABELA ANOVA MASSA ESPECÍFICA .....	71
TABELA 24: REPETIÇÕES ABSORÇÃO AGREGADO MIÚDO .....	71
TABELA 25: TABELA ANOVA ABSORÇÃO .....	72
TABELA 26: FAIXAS GRANULOMÉTRICAS PARA CBUQ (NORMA DNIT 31/2006 – ES).....	74
TABELA 27: COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS NAS MISTURAS .....	74
TABELA 28: GRANULOMETRIA DAS MISTURAS - % PASSANTE .....	75
TABELA 29: MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DOS AGREGADOS .....	76
TABELA 30: DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE SAYBOLT-FUROL CAP 50/70 .....	78
TABELA 31: TEMPERATURA DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	78
TABELA 32: PROPRIEDADES MARSHALL (DNIT, ES 31/2006).....	94
TABELA 33: CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS AGREGADO NATURAL (AN) .....	94
TABELA 34: CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS A20M50 .....	95
TABELA 35: CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS A20M100 .....	95
TABELA 36: CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS A40M50 .....	96

TABELA 37: CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS A40M100 .....	96
TABELA 38: TEOR DE PROJETO DO LIGANTE ASFÁLTICO .....	100
TABELA 39: RESULTADOS DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....	105
TABELA 40: RESULTADOS RT AN, A40M50 E A40M100 .....	106
TABELA 41: RESULTADOS MR AN, A40M50 E A40M100 .....	107
TABELA 42: RESULTADOS MR/RT A40M50 E A40M100 .....	108
TABELA 43: RESULTADO DE DANO POR UMIDADE INDUZIDA A40M100 .....	110
TABELA 44: CUSTO UNITÁRIO INSUMOS (2013) .....	111
TABELA 45: COMPARATIVO DE CUSTO ENTRE AS MISTURAS .....	112

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

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

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC: *Asphalt Cement*

AI: *Asphalt Institute*

ANTT: Agência Nacional de Transportes Terrestres

ANOVA: Análise de Variância

ARC: Agregado reciclado de concreto

ARCm: Agregado miúdo reciclado de concreto

ARM: Agregado reciclado misto

ARP: Agregado reciclado de pavimento

ASTM: *American Society of Testing and Materials*

BS: *British Standard*

°C: Graus Celsius

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CEC: *Community European Committee*

CNT: Confederação Nacional do Transporte

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP: corpo de prova

DMT: Densidade Máxima Teórica

DMM: Densidade Máxima Medida

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (extinto)

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EC: *European Commission*

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

ES: Especificação de ensaio

EUA: Estados Unidos da América

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

FDOT: *Florida Department of Transportation*

FHWA: *Federal Highway Administration*

Gmb: Massa específica aparente

h: hora

IBP: Instituto Brasileiro do Petróleo  
INMETRO: Instituto Brasileiro de Pesos e Medidas  
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change  
km: quilômetros  
LAMP: Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Paraná  
m<sup>3</sup>: metro cúbico  
ME: Método de Ensaio  
MPa: Mega Pascal, unidade de medida padrão das normas técnicas  
MPOG: Ministério do Planejamento  
MR: Módulo de resiliência  
NBR: Norma Brasileira  
ONU: Organização das Nações Unidas  
PETROBRAS: Petróleo Brasileiro S.A.  
PF: Ponto de Fulgor  
PGRCC: Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil  
PBQP-H: Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat  
PROMGER: Programa Municipal de Geração de Resíduos de Curitiba  
RBV: Relação Betume-Vazios  
RCRA : *Resource Conservation and Recovering Act*  
RCC: Resíduos de Construção Civil  
RCD: Resíduos de Construção e Demolição  
REPAR: Refinaria Presidente Getúlio Vargas  
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)  
SUPERPAVE: Superior Performance Asphalt Pavements  
t: toneladas  
T: Temperatura  
VAM: Vazios do Agregado Mineral  
VCB: Vazios Cheios de Betume  
Vv: Volume de vazios  
WSDOT: *Washington State Department Transportation*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	PROBLEMA E RELEVÂNCIA.....	1
1.2	JUSTIFICATIVA.....	2
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.4	DELIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	4
1.5	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA.....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>6</b>
2.1	COMPOSIÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA DO BRASIL.....	6
2.2	COMPOSIÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA DO PARANÁ.....	7
2.3	PANORAMA SOBRE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	8
2.4	COMPETÊNCIAS LEGAIS.....	13
2.4.1	Resolução CONAMA 307.....	14
2.4.2	Política nacional de resíduos sólidos (PNRS) de 2010.....	16
2.4.3	PBQP-H (Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat).....	18
2.4.4	Instrução 01/2010 do Ministério Público.....	19
2.4.5	Decreto nº 7.746, de 2012 (Lei nº 8666/93).....	19
2.5	SUSTENTABILIDADE E DURABILIDADE.....	20
2.6	CONSUMO DE AGREGADOS EM PAVIMENTAÇÃO.....	22
2.7	AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO (ARC).....	24
2.7.1	Massa específica.....	25
2.7.2	Absorção.....	26
2.7.3	Perda por abrasão Los Angeles.....	28
2.8	CONCRETOS BETUMINOSOS USINADOS A QUENTE - CBUQ.....	29
2.9	AGREGADOS PARA USO EM CBUQ.....	32
2.9.1	Características do agregado para uso em CBUQ.....	34
2.9.2	Caracterização dos agregados segundo o SHRP.....	36
2.9.3	Normas nacionais e internacionais para uso de agregados em CBUQ.....	36
2.10	EXPERIÊNCIAS DO USO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO EM CBUQ.....	39
2.11	PROPRIEDADES DO CBUQ COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS.....	48
2.11.1	Parâmetros volumétricos primários.....	48
2.11.2	Parâmetros volumétricos secundários.....	49
2.11.2.1	Volume de vazios (Vv).....	50
2.11.2.2	Vazios de agregados minerais (VAM).....	51
2.11.2.3	Relação betume/vazios (RBV).....	52
2.11.3	Teor de ligante.....	53
2.11.4	Deformação Permanente.....	54
2.11.5	Módulo de Resiliência (MR).....	55
2.11.6	Resistência à Tração (RT).....	56
2.11.7	Absorção de água e absorção de asfalto.....	56
2.11.8	Temperatura.....	61
2.11.9	Durabilidade.....	62
2.12	A INFLUÊNCIA DO AGREGADO MIÚDO NAS MISTURAS BETUMINOSAS.....	62
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>65</b>
3.1	DELIMITAÇÃO.....	65
3.2	VARIÁVEIS.....	65

3.3	INTERAÇÕES.....	65
3.4	PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS.....	65
3.5	OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E DO LIGANTE ASFÁLTICO.....	66
3.5.1	Obtenção e caracterização dos agregados naturais e de ARCM .....	66
3.5.2	Obtenção e caracterização do CAP.....	69
3.5.3	Análise estatística da massa específica e absorção do agregado miúdo reciclado de concreto .....	70
3.6	DOSAGEM MARSHALL .....	72
3.6.1	Curvas granulométricas .....	74
3.6.2	Determinação da massa específica dos agregados.....	75
3.6.3	Determinação dos teores de ligantes a serem moldados .....	77
3.6.4	Moldagem dos corpos de prova das misturas.....	77
3.7	DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ABSORÇÃO DE ASFALTO.....	85
3.8	DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....	86
3.9	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	89
3.10	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	90
3.11	DETERMINAÇÃO DO DANO POR UMIDADE INDUZIDA (DUI) .....	92
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>94</b>
4.1	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MARSHALL E TEOR DE PROJETO.....	94
4.2	DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....	100
4.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	106
4.4	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	107
4.5	DETERMINAÇÃO DO DANO POR UMIDADE INDUZIDA.....	109
4.6	CUSTOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	111
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>113</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>	<b>116</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA

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 resíduos de construção e demolição (RCD), também chamados de resíduos de construção civil (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).

A preocupação com resíduos de maneira geral é relativamente recente no Brasil. Diferente de países como os EUA onde no final da década de 1960 já existia uma política para resíduos, chamada de *Resource Conservation and Recovering Act* (RCRA) no Brasil ainda está em discussão uma legislação mais abrangente sobre resíduos. Apesar de algum avanço na reciclagem de resíduos domiciliares, e da obrigatoriedade de recolhimento de pneus e baterias, estamos certamente ainda longe de políticas mais abrangentes como a política do governo dos EUA de compra preferencial de produtos ambientalmente saudáveis, que privilegia produtos contendo resíduos (AGOPYAN, 2003) ou da abrangente política da Alemanha.

Segundo John (2000), a indústria da construção civil consome entre 15% a 50% de todos os recursos extraídos da natureza. Essa quantidade coloca esse setor como o maior consumidor individual de recursos naturais.

De acordo com Zordan (2003), o grande consumo de matérias-primas está diretamente ligado ao grande desperdício de material que ocorre nos empreendimentos, a vida útil das estruturas construídas e devido às obras de reparos e adaptações das edificações existentes.

A construção e a demolição são também as maiores fontes de resíduos. Estima-se que os RCD variam mundialmente de 163 a 3658 kg per capita/ano, com

valores típicos de 400 kg per capita/ano, que são valores característicos de resíduo doméstico sólido (JOHN, 2000). É necessário adicionar a este total todos os resíduos gerados durante a produção de materiais de construção.

É cada vez mais difícil e caro para as empresas dispor os RCD. Por razões ambientais, autoridades públicas estão procurando maneiras de reutilizar esses materiais. Neste trabalho é apresentada a possibilidade técnica do uso de agregado reciclado de concreto para execução de concreto betuminoso usinado a quente.

O futuro da pavimentação inevitavelmente envolverá o uso de materiais reciclados. Esta tendência de sustentabilidade é devida ao impacto ambiental positivo que materiais reciclados podem ter quando utilizados na execução de sub-bases, bases ou revestimentos de pavimentos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O uso de materiais reciclados tem crescido em pavimentação nos últimos anos. Os agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil podem ser empregados em reforços do subleito ou sub-bases desde que atendam às especificações da norma NBR 15116 (ABNT, 2004). Esta especificação permite seu uso como material de base em vias de baixo volume de tráfego, como por exemplo, em vias urbanas.

A aplicação de agregado reciclado de concreto em base e sub-base de estradas vem sendo extensivamente estudada na literatura disponível (RAFI *et al.*, 2010). Por outro lado, o uso de agregados reciclados na mistura quente de asfalto é um campo pouco explorado (SHEN & DU, 2004), o que justifica a escolha desta pesquisa.

Segundo dados do DNIT (2013), a malha rodoviária brasileira é composta de 1.713.885,30 km, totalizando uma malha pavimentada de 202.589,10 km. Estes dados indicam que apenas 11,82% desse total possui pavimentação, do qual a grande maioria são rodovias federais.

Segundo a rede do SNV publicado por DNIT (2013) o índice de rodovias sem pavimentação é de 10,5% para as rodovias federais, de 43,7% para as estaduais e de 92,2% para as municipais. Estes dados indicam que aproximadamente 79,3% da malha rodoviária nacional não é pavimentada e desses

1.358.792,8 km sem pavimentação, um montante de 1.234.918,3 km pertencem à rede municipal.

Sendo assim, observa-se que o uso de agregados reciclados de concreto (ARC) em revestimentos asfálticos tipo CBUQ pode se tornar uma alternativa interessante, pelas vantagens ambientais que ela oferece e pela possível redução de custo dos serviços de pavimentação. A utilização de agregado miúdo reciclado traz a redução do uso de recursos naturais, principalmente em rodovias municipais e de baixo tráfego onde há maior carência de revestimento.

Entretanto, para que isto seja possível, é necessário que seja desenvolvido um procedimento racional de uso dos agregados reciclados miúdos de concreto em CBUQ, pois já que este tipo de agregado apresenta características peculiares como alta variabilidade, possível presença de contaminação e propriedades físicas diferentes dos agregados naturais, sua utilização requer uma extensa pesquisa para verificar sua adequação como um agregado sustentável no CBUQ.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a viabilidade técnica de se utilizar agregados miúdos reciclados de concreto (ARCm) em CBUQ em substituição ao agregado miúdo natural.

Como objetivos específicos desta pesquisa, podem ser citados:

- realizar misturas asfálticas do tipo CBUQ, com diferentes proporções e amostras de ARCm, produzidas a partir de concretos de diferentes classes de resistência, 20 e 40 MPa, avaliando o efeito da substituição do agregado miúdo tipo pó de pedra pelos agregados miúdos reciclados de concreto nos parâmetros volumétricos da metodologia Marshall, enquadrados na faixa C do DNIT, utilizando o ligante convencional CAP 50/70;
- avaliar o comportamento mecânico das misturas estudadas através dos ensaios: resistência à tração estática por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), resistência à tração retida por umidade induzida (RRT) e deformação permanente;

- avaliar as propriedades volumétricas das misturas estudadas da dosagem Marshall quanto aos limites especificados em norma brasileira;
- avaliar qual ou quais propriedades físicas dos ARCM estão influenciando no desempenho do CBUQ, para produzir revestimentos asfálticos de baixo tráfego.

Assim, pretende-se responder às seguintes questões: qual será o desempenho quanto à deformação permanente de concretos betuminosos usinados a quente (CBUQ) com o uso de agregado miúdo reciclado de concreto (ARCM) em substituição do agregado miúdo artificial (tipo pó de pedra)? Como se comportam as misturas com o aumento de agregado miúdo reciclado na mistura com relação às propriedades volumétricas da dosagem Marshall?

#### 1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

As duas amostras de ARC utilizadas na pesquisa possuem resistências diferentes, porém os materiais que compõem o concreto original são de mesma natureza. Além disto, somente um tipo de CAP (50/70) foi utilizado em toda a pesquisa.

#### 1.5 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

Esta dissertação de mestrado está organizada em 6 capítulos.

O capítulo 1 INTRODUÇÃO apresenta um panorama e 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.

O capítulo 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA traz um panorama sobre resíduos da construção civil e são abordados temas tais como: competências legais, agregado reciclado de concreto, cita algumas pesquisas utilizando agregado reciclado de concreto, propriedades do agregado reciclado de concreto, concreto

asfáltico com agregados reciclados e sua utilização em pavimentação relatando experiências nacionais e internacionais.

O capítulo 3 apresenta o PROGRAMA EXPERIMENTAL, descrevendo os MATERIAIS E MÉTODOS que foram utilizados na pesquisa, as técnicas experimentais para a realização dos ensaios para caracterização dos materiais, dosagem Marshall e deformação permanente. Nesta etapa foram determinadas quais as variáveis de resposta que seriam relevantes e adequadas aos objetivos propostos, delimitando o “universo” pesquisado. Apresenta também o processo para determinação do teor de projeto.

O capítulo 4 apresenta a ANÁLISE DOS RESULTADOS.

O capítulo 5 apresenta CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.

O capítulo 6 apresenta SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COMPOSIÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA DO BRASIL

A infraestrutura logística brasileira, resultado de vários anos de baixos investimentos públicos, restringe o desenvolvimento do país e das empresas nacionais. Observa-se que em 1975 foram investidos 1,84% do PIB em infraestruturas de transportes, enquanto que em 2011 foram investidos 0,36% do PIB (CNT, 2012).

Segundo dados do DNIT (2013), dos 1.713.885,30 km das vias existentes no Brasil, 79,3% são de vias não pavimentadas, 11,8% são de vias não pavimentadas e 8,9% são vias planejadas (Figura 1).

Dos Estados brasileiros, conforme mostrado na (Figura 2), o estado que possui maior extensão pavimentada é o estado de São Paulo e o que possui maior extensão não pavimentada é o de Minas Gerais.

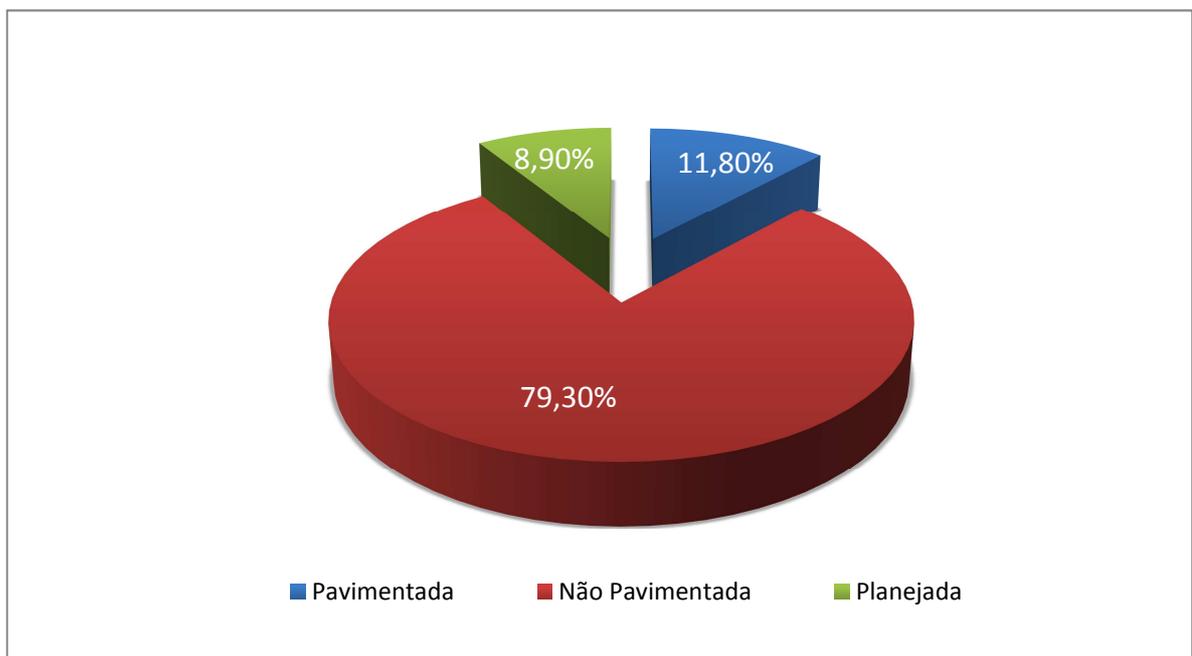


FIGURA 1: REDE DO SNVTOTAL (DNIT, 2013).

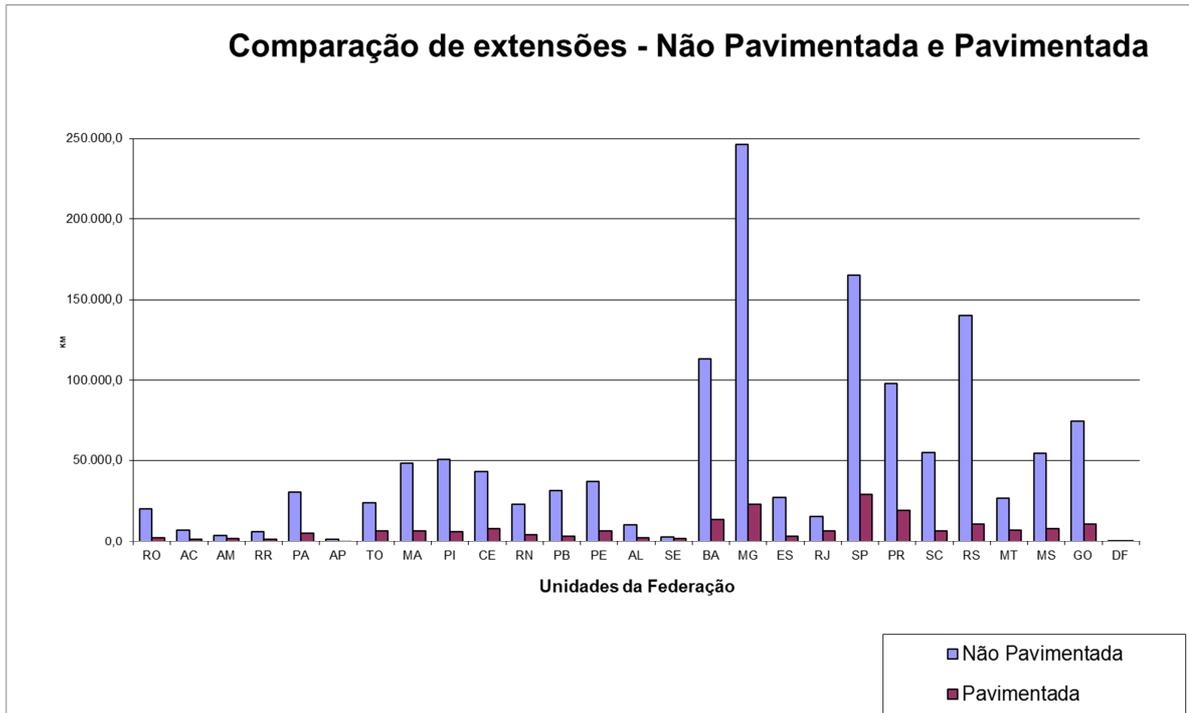


FIGURA 2: COMPARAÇÃO DE EXTENSÕES NÃO PAVIMENTADAS E PAVIMENTADAS NAS UNIDADES DA FEDERAÇÃO (DNIT, 2013).

Diante da importância do modal rodoviário brasileiro, em contrapartida com o investimento no setor, verificam-se altos custos logísticos incorridos, que fazem com que produtos brasileiros não consigam competir no mercado externo, afetando diretamente o chamado Custo Brasil e restringindo o crescimento da economia brasileira. Como exemplo pode-se citar o custo do frete rodoviário da soja, que no Brasil é 3,7 vezes maior que na Argentina e 4,3 vezes maior que nos EUA (CNT, 2012).

## 2.2 COMPOSIÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA DO PARANÁ

A malha rodoviária do Estado do Paraná é constituída por rodovias federais, estaduais e municipais. As rodovias federais são definidas pelo Plano Nacional de Viação (P.N.V) e as rodovias estaduais são definidas pelo Sistema Rodoviário Estadual (S.R.E).

As rodovias podem ser administradas pelas instituições públicas responsáveis - DER (Governo Estadual), DNIT (Governo Federal) ou concedidas à iniciativa privada (Empresas Concessionárias).

Atualmente existem trechos de rodovias federais delegados ao Estado, sendo que alguns são administrados pelo próprio DER e outros foram concedidos às Empresas Concessionárias.

O Estado do Paraná ocupa uma área de 199,3 mil quilômetros quadrados, composto de 399 municípios, com 10.444.526 habitantes, o que corresponde a 52,4 hab/km<sup>2</sup> e possui uma frota de 5.740.414 veículos (CNT, 2012).

Segundo dados do DNIT mostrados, a malha viária estadual total é composta por 119,8 mil quilômetros, destes 102,7 mil de estradas municipais, 6,2 mil quilômetros de rodovias federais e 10,9 mil quilômetros de rodovias estaduais.

Desta malha estadual 81,9% correspondem a vias não pavimentadas, sendo que dos 102,7 mil quilômetros de estradas municipais que correspondem a rodovias rurais de baixo volume de tráfego somente 6% é pavimentada.

Muitos municípios possuem acesso somente por estradas de terra, sem pavimento asfáltico, fazendo com que comunidades inteiras fiquem isoladas em períodos de fortes chuvas, com grandes dificuldades para deslocamento e escoamento da produção. O desenvolvimento econômico e social da população destes locais é seriamente comprometido. A pavimentação dessas vias de acesso é importante, pois traz grandes benefícios à população local. Além de melhorar o escoamento de produtos agrícolas e reduzir os custos operacionais de transporte, ela ajuda na fixação do homem do campo e permite o acesso fácil e rápido a equipamentos de saúde e educação, que geralmente estão distantes destas comunidades. Porém, muitas dessas rodovias são projetadas mas nunca “saem do papel”. Geralmente, os custos de implantação elevados, frente ao baixo volume de tráfego acabam inviabilizando a execução da obra.

### 2.3 PANORAMA SOBRE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Os resíduos de construção e demolição (RCD) representam um grave problema em muitas cidades brasileiras devido à disposição irregular desses resíduos acarretando em problemas de ordem estética, ambiental e de saúde pública, e mais ainda é um dos responsáveis pelo esgotamento de áreas de aterros em cidades de médio e grande porte, uma vez que eles correspondem em massa a 61% dos resíduos sólidos urbanos (PINTO, 2005).

No cenário nacional os RCD têm sido coletados, segundo o SNIS (BRASIL, 2010c), no montante de 7.192.372 t/ano de origem pública e 7.365.566 t/ano de origem privada, totalizando 14.557.939 t/ano.

Por outro lado, o setor da construção civil é um grande consumidor de recursos naturais não renováveis. Os agregados naturais estão entre os minerais mais consumidos no Brasil ( $380,6 \times 10^6$  t/ano) e no mundo, além de impactos ambientais relevantes como geração de áreas degradadas no entorno urbano e transporte intensivo (ANGULO *et al.*, 2002).

O mercado dos agregados naturais é vasto e mesmo que todo o RCD seja utilizado como agregado, a participação no mercado total não seria superior a 20%. Entretanto, este mercado está dividido em diversas aplicações: pavimentação, argamassas, concretos de diferentes resistências. O uso de agregados para atividades de pavimentação não é suficiente para permitir a reciclagem completa dos resíduos, sendo necessário à utilização em outras aplicações, em especial, argamassas e concretos, em função da grande demanda (ANGULO *et al.*, 2002).

O destino final dos resíduos gerados pela atividade da construção civil é um desafio para a sociedade. Diante desta problemática, o RCD foi classificado como resíduo prioritário pelo *Community European Committee* (CEC) e sua reciclagem tem sido estudada com afinco por vários países desenvolvidos há 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 (RAFI *et al.*, 2010).

A (Tabela 1), apresenta dados de várias pesquisas sobre as estimativas de resíduos de construção civil gerados em diversos países.

TABELA 1: ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (JOHN E AGOPYAN, 2000).

País	Quantidade Anual		Fonte
	(Mton/ano)	kg/hab	
Suécia	1,2 – 6	136 – 680	TOLSTOY, BORKLUND & CARLSON (1998); EU (1999)
Holanda	12,8 – 20,2	820 – 1300	LAURITZEN (1998); BROSSINK, BROWERS & VAN KESSEL (1996); EU (1999)
EUA	136 – 171	463 – 584	EPA (1998); PENG, GROSSKOPF, KIBERT (1994)
Reino Unido	50 – 70	880 – 1120	DETR (1998); LAURITZEN (1998)
Bélgica	7,5 – 34,7	735 – 3359	LAURITZEN (1998); EU (1999)
Dinamarca	2,3 – 10,7	440 – 2010	
Itália	35 – 40	600 – 690	
Alemanha	79 – 300	963 – 3658	
Japão	99	785	KASSAI (1998)
Portugal	3,2-4,4	325	EU (1999)
Brasil	31	230 – 760	ABRELPE (2011); PINTO (1999); CARNEIRO <i>et al.</i> (2001); PINTO E GONZALEZ (2005)

Na (Tabela 2), Affonso (2005) cita qual é a produção de RCD em algumas cidades brasileiras.

TABELA 2: PRODUÇÃO DE RCD EM ALGUMAS CIDADES BRASILEIRAS (AFFONSO, 2005).

Nº	Local	População (milhões de habitantes)	Geração de entulho (t/dia)	% entulho em relação ao RSU	Produção de entulho (kg/hab/dia)	Fonte
1	São Paulo	15	5000	ND	0,33	LEITE (2001)
2	Porto Alegre	1,2	300	ND	0,29	LEITE (2001)
3	Salvador	2,2	2750	50	1,25	NUNES (2004)
4	Ribeirão Preto	0,46	1043	67	2,27	LEITE (2001)
5	S. José do Rio Preto	0,32	687	ND	2,15	LEITE (2001)
6	Jundiá	0,29	712	ND	2,46	LEITE (2001)
7	Santo André	0,63	1013	58	1,61	LEITE (2001)
8	Belo Horizonte	2,01	1200	51	0,6	LEITE (2001)
9	Vitória da Conquista	0,24	310	ND	1,29	LEITE (2001)
10	S. José dos Campos	0,5	733	65	1,47	LEITE (2001)
11	Rio de Janeiro	5,9	863	19	0,14	NUNES (2004)

John e Agopyan (2000) obtiveram uma mediana dos dados obtidos por Pinto (2000) igual a 0,51 t/hab.ano, em conjunto com dados do IBGE (1996), considerando o ano com 300 dias úteis. Os autores elaboraram uma tabela com os resultados, replicada neste trabalho (Tabela 3), e chegaram à conclusão que das 4.974 áreas urbanas, 152 apresentam geração estimada de resíduo acima de 200 toneladas por dia útil e são nesses municípios, com mais de 120 mil habitantes, que

residem 56% da população brasileira. Como regra geral, quanto maior a cidade, mais grave se torna a questão dos resíduos de construção.

TABELA 3: CLASSIFICAÇÃO DOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS DE ACORDO COM A GERAÇÃO DE RCD PELA POPULAÇÃO URBANA (JOHN; AGOPYAN, 2000).

População (mil)	RCD (t/dia útil)	Nº mun	População		RCD médio (t/dia)
			%	Média	
<120	<200	4822	44,2	11.281	18
120 – 300	200 – 500	103	16,0	190.873	318
300 – 600	500 – 1.000	25	8,3	410.865	684
600 – 3.000	1.000 – 5.000	22	19,3	1.082.086	1.803
>3.000	>5.000	2	12,1	7.471.325	12.452

Atualmente existem mais de 150 usinas de reciclagem de RCD no Brasil. Se todas estivessem operando em sua capacidade nominal, teríamos, no máximo, 10% do RCD gerado sendo reciclado considerando uma geração de 128 t / 1.000 hab / ano no país. 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 (ABRECON, 2013). A (Tabela 4) apresenta informações de algumas usinas de reciclagem brasileiras.

TABELA 4: EXEMPLOS DE USINAS DE RECICLAGEM IMPLANTADAS NO BRASIL ATÉ NOVEMBRO DE 2008 (MIRANDA ET AL., 2009).

Cidade	Propriedade	Instalação	Capacidade e (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
Muriaé/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

A variabilidade da composição de RCD em algumas cidades brasileiras foi observada em pesquisas anteriores, na (Tabela 5) verifica-se que o maior percentual referente a composição destes resíduos é de concreto e argamassa sugerindo um maior aproveitamento destes resíduos.

TABELA 5: COMPOSIÇÃO DE RCD NO BRASIL (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) S. 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%	-	-

Em termos de coleta, um estudo da ABRELPE apresenta a quantidade coletada de RCD em 2010, sendo estimada para o país aproximadamente 99.354 t/dia. No Brasil, do total de 5.564 municípios, 72,44% dos municípios avaliados pela PNSB possuem serviço de manejo de resíduos de construção civil, sendo que, 2.937 municípios (52,79%) exercem o controle sobre os serviços de terceiros para os resíduos especiais (IBGE, 2010). A maioria dos municípios (55,26%) exerce o

controle sobre o manejo de resíduos especiais executados por terceiros para manejo de RCD (PNRS, 2010).

A (Tabela 6 ) mostra os resultados para as regiões do país. Verifica-se que a região nordeste é a que apresenta percentual maior de controle sobre manejo de resíduos de construção RCD.

TABELA 6: MUNICÍPIOS NO BRASIL COM SERVIÇO DE MANEJO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL POR REGIÃO (SNIS, 2010).

Região	Municípios Avaliados	Municípios com serviços	Percentual
Norte	449	293	65,25%
Nordeste	1.793	1.454	81,09%
Sudeste	1.668	1.272	76,26%
Sul	1.188	639	53,78%
Centro-oeste	466	373	80,04%

A pesquisa do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento- SNIS (BRASIL, 2010c), com base nos dados de 2008, identificou os municípios brasileiros que coletam RCD (por amostragem), por meios próprios ou contratação de terceiros e, os municípios que cobram por esses serviços. Ainda avaliou a quantidade coletada de RCD, de origem pública e privada. A (Tabela 7) apresenta os resultados para a Região Sul.

TABELA 7: MUNICÍPIOS NO BRASIL COM SERVIÇO DE MANEJO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL POR REGIÃO (SNIS, 2010).

UF	Municípios participantes da pesquisa	Quantidade coletada de RCC de origem pública (t/ano)	Quantidade coletada de RCC de origem privada (t/ano)	Número de municípios com coleta executada pela prefeitura	Número de municípios que cobra pelo serviço de coleta
PR	26	77.442	681.742	10	1
SC	19	58.105	32.720	5	1
RS	34	886.017	328.875	17	5

## 2.4 COMPETÊNCIAS LEGAIS

Os RCD estão sujeitos à Legislação Federal referente aos resíduos sólidos, bem como a legislação específica no âmbito Estadual e Municipal e às normas técnicas brasileiras. A (Tabela 8) mostra os instrumentos legais e normativos de abrangência nacional legislação atual sobre o tema.

TABELA 8: INSTRUMENTOS LEGAIS E NORMATIVOS DE ABRANGÊNCIA NACIONAL.

Decreto nº 7.404 / 2010	Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.
Lei Federal nº 12.305 / 2010	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
Lei Federal nº 11.445 / 2007	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.
Resolução nº 348 / 2004	Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos.
Resolução nº 307 / 2004	Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.
Lei Federal nº 10.257 / 2001	Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.
Lei Federal nº 9.605 / 1998	Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.
Lei Federal nº 6.938 / 1981	Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.
Resolução nº 431 / 2011	Por meio da qual o gesso passou a ser enquadrado na classe B.

Para enfrentar o problema do elevado desperdício de materiais na construção civil e conseqüente volume de RCD gerado, o Estado e os municípios lançam mão da criação de 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 (MARINHO, 2011).

Há competência material comum da União, Estados, Distrito Federal e municípios no assunto de proteção do meio ambiente, de acordo com o artigo 23 da Carta Magna de 1988, podendo cada um dos entes federativos fiscalizar e regulamentar condutas para a adequada gestão dos resíduos em estudo. Contudo, de forma específica o artigo 30, inciso V da Constituição Federal disciplina que compete aos municípios a organização e prestação dos serviços públicos de interesse local, entre eles o gerenciamento dos resíduos urbanos.

#### 2.4.1 Resolução CONAMA 307

A Resolução 307, de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o marco regulatório, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos

para a gestão (ambientalmente correta) dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias à minimização dos impactos (efeitos) ambientais, levando em conta a política urbana de pleno desenvolvimento da função social das cidades e da propriedade urbana (Lei 10.257 de 2001). Na referida Resolução é definido que os geradores de resíduos da construção devem ter como objetivo principal a não geração de tais resíduos e, em caráter secundário, a redução, reutilização, reciclagem, bem como a responsabilidade pela destinação final de tais materiais, levando em conta que tais resíduos não podem ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares (resíduos urbanos), em “bota-fora”, encostas, corpos de água, lotes vagos, bem como em áreas legalmente protegidas por lei. Para tal exigência da referida Resolução, cada município deve obrigatoriamente desenvolver e implantar o Plano Municipal de Gestão dos Resíduos da Construção Civil.

A partir de julho de 2004, de acordo com a resolução 307 do CONAMA, as prefeituras estão proibidas de receber os RCD no aterro sanitário. Cada município deverá ter 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 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.

*Art. 3º. Os resíduos da construção civil deverão ser classificados, para efeito desta Resolução, da seguinte forma:*

*I – Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:*

*a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;*

*b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;*

*c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.*

*II – Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, gesso e outros;*

*III – Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação.*

*IV – Classe D – são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.*

*Art. 4º. Os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final.*

*§ 1º. Os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota-fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei, obedecidos os prazos definidos no art. 13 desta Resolução.*

*§ 2º. Os resíduos deverão ser destinados de acordo com o disposto no art. 10 desta Resolução.*

*Art. 5º. É instrumento para a implementação da gestão dos resíduos da construção civil o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, a ser elaborado pelos Municípios e pelo Distrito Federal, o qual deverá incorporar:*

*I – Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil; e*

*II – Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil.*

*Art. 10. Os resíduos da construção civil deverão ser destinados das seguintes formas:*

*I – Classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;*

*II – Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;*

*III – Classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas;*

*IV – Classe D: deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.*

#### 2.4.2 Política nacional de resíduos sólidos (PNRS) de 2010

A aprovação da Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), após longos vinte e um anos de discussões no Congresso Nacional marcou o início de uma forte articulação institucional

envolvendo os três entes federados – União, Estados e Municípios, o setor produtivo e a sociedade civil na busca de soluções para os graves problemas causados pelos resíduos, que vem comprometendo a qualidade de vida dos brasileiros.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, criada pela Lei nº 12.305, de 2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 2010, criou como um dos seus principais instrumentos o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. O Decreto nº 7.404/2010 instituiu e delegou ao Comitê Interministerial - CI, composto por 12 Ministérios e coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente, a responsabilidade de coordenar a elaboração e a implementação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, conforme previsto na Lei 12.305/2010 tem vigência por prazo indeterminado e horizonte de 20 (vinte) anos, com atualização a cada 04 (quatro) anos e contemplará o conteúdo mínimo conforme segue: *“I - diagnóstico da situação atual dos resíduos sólidos; II - proposição de cenários, incluindo tendências internacionais e macroeconômicas; III - metas de redução, reutilização, reciclagem, entre outras, com vistas a reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada; IV - metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos; V - metas para a eliminação e recuperação de lixões, associadas à inclusão social e à emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis; VI - programas, projetos e ações para o atendimento das metas previstas; VII - normas e condicionantes técnicas para o acesso a recursos da União, para a obtenção de seu aval ou para o acesso a recursos administrados, direta ou indiretamente, por entidade federal, quando destinados a ações e programas de interesse dos resíduos sólidos; VIII - medidas para incentivar e viabilizar a gestão regionalizada dos resíduos sólidos; IX - diretrizes para o planejamento e demais atividades de gestão de resíduos sólidos das regiões integradas de desenvolvimento instituídas por lei complementar, bem como para as áreas de especial interesse turístico; X - normas e diretrizes para a disposição final de rejeitos e, quando couber, de resíduos; XI - meios a serem utilizados para o controle e a fiscalização, no âmbito nacional, de sua implementação e operacionalização, assegurado o controle social”*.

Os RCD são definidos no Artigo 13 da PNRS como sendo os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis (PNRS, 2010).

TABELA 9: ESTADOS COM POLÍTICA ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS, 2010).

ESTADO	REGULAMENTAÇÃO
Ceará	Lei nº 13.103 / 2001
Mato Grosso	Lei nº 7.862 / 2002
Minas Gerais	Lei nº 18.031 / 2009
Paraná	Lei nº 13.337 / 2005
Pernambuco	Lei nº 14.236 / 2010
Rio de Janeiro	Lei nº 4.191 / 2003
Santa Catarina	Lei nº 13.557 / 2003
São Paulo	Lei nº 12.300 / 2006

No estado do Paraná, a Política Estadual de Resíduos Sólidos tem como base a legislação nacional, promulgada em 2010, que estabelece a logística reversa e responsabiliza o poder público pela realização de planos para o gerenciamento do lixo. A política estadual deve estar alinhada à política nacional e às características deste Estado.

No município de Curitiba a lei municipal nº 11.682 / 2006, dispõe sobre o (PROMGER) programa municipal de gerenciamento de resíduos da construção civil em Curitiba.

#### 2.4.3 PBQP-H (Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat)

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.

#### 2.4.4 Instrução 01/2010 do Ministério Público

Um grande avanço sobre o tema é a IN SLTI/MPOG - Instrução 01/2010 do Ministério Público que estabelece a inclusão de critérios de sustentabilidade em licitações públicas conforme abaixo:

- assegurar o uso de insumo reciclado na produção de materiais de construção;
- assegurar a compra preferencialmente de materiais conforme especificações do PBQP-H;
- assegurar a compra de materiais provenientes de fornecedores submetidos a Licenciamento Ambiental.

*Art. 4º- Os instrumentos convocatórios e contratos de obras e serviços de engenharia deverão exigir o uso obrigatório de agregados reciclados nas obras contratadas, sempre que existir a oferta de agregados reciclados, capacidade de suprimento e custo inferior em relação aos agregados naturais, bem como o fiel cumprimento do PGRCC, sob pena de multa, estabelecendo, para efeitos de fiscalização, que todos os resíduos removidos deverão estar acompanhados de Controle de Transporte de Resíduos, em conformidade com as normas da Agência Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, ABNT NBR nºs 15.112, 15.113, 15.114, 15.115 e 15.116, de 2004, disponibilizando campo específico na planilha de composição dos custos.*

*Art. 5º- Os órgãos e entidades da Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, quando da aquisição de bens, poderão exigir os seguintes critérios de sustentabilidade ambiental:*

*I – que os bens sejam constituídos, no todo ou em parte, por material reciclado, atóxico, biodegradável, conforme ABNT NBR – 15448-1 e 15448-2;*

*II – que sejam observados os requisitos ambientais para a obtenção de certificação do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO como produtos sustentáveis ou de menor impacto ambiental em relação aos seus similares;*

#### 2.4.5 Decreto nº 7.746, de 2012 (Lei nº 8666/93)

Decreto nº 7.746, de 5 de junho de 2012 que Regulamenta o art.3º da Lei nº 8666, de 21 de junho de 1993, para estabelecer critérios, práticas e diretrizes para a promoção do desenvolvimento nacional sustentável nas contratações realizadas pela administração pública federal, e institui a Comissão Interministerial de Sustentabilidade na Administração Pública – CISAP, estabelece que:

*Art. 5º A administração pública federal direta, autárquica e fundacional e as empresas*

*estatais dependentes poderão exigir no instrumento convocatório para a aquisição de bens que estes sejam constituídos por material reciclado, atóxico ou biodegradável, entre outros critérios de sustentabilidade.*

*Art. 6º- As especificações e demais exigências do projeto básico ou executivo para contratação de obras e serviços de engenharia devem ser elaboradas, nos termos do art. 12 da Lei nº 8666, de 1993, de modo a proporcionar a economia da manutenção e operacionalização da edificação e a redução do consumo de energia e água, por meio de tecnologias, práticas e materiais que reduzam o impacto ambiental.*

## 2.5 SUSTENTABILIDADE E DURABILIDADE

A pavimentação de uma via é sem dúvida, uma das mais importantes intervenções do poder público voltada para a melhoria de qualidade de vida das comunidades, pois com sua conclusão há a inclusão, em processo contínuo, de outros bens que trarão benefícios diretos ou indiretos à população, e ainda abrindo ou melhorando o acesso a estas comunidades.

Porém a otimização dos recursos destinados à materialização de uma obra de pavimentação inclui como, por exemplo: a escolha de materiais duráveis, adoção de boas técnicas construtivas, de modo a entregar um produto de qualidade à população, respeitando aspectos econômicos bem como sustentabilidade e durabilidade da via.

ABEDA (2010) cita que há um conjunto de medidas e ações para que ocorra esta otimização dos recursos, os mais importantes no que se refere a uma obra de pavimentação:

- apreciação de custos de exploração das fontes naturais, inclusive custos para recomposição/mitigação de eventuais danos ambientais;
- aprovação e licenciamento nos órgãos e entidades ambientais;
- realização de detalhamento topográfico;
- identificação da existência de algum problema ou obstáculo, por exemplo, desapropriação que tenha que ser resolvido antes do início da obra de pavimentação;
- caracterização do solo existente no subleito da via a ser pavimentada;
- caracterização do volume de tráfego existente, acrescido da participação do

tráfego gerado desviado, em conjunto com a vida de projeto e outras considerações técnicas que subsidiarão a seleção da camada de rolamento e a definição da estrutura (tipo e espessura) do pavimento;

- avaliação do potencial de equipamentos e recursos humanos e da qualificação técnica executiva das empresas de pavimentação, de modo a verificar a compatibilidade entre as soluções adotadas no anteprojeto e projeto básico e a capacidade de realização de obras instaladas na região do empreendimento;
- escolha dos materiais visando sustentabilidade, durabilidade e diminuição do impacto ambiental;
- avaliação técnica e econômica das soluções de pavimentação, possibilitando à administração pública selecionar a mais conveniente sob a ótica técnica, executiva e econômica aos interesses públicos.

De acordo com Isaia (2007), no sentido estrito do termo, a durabilidade dos materiais está ligada à sua capacidade de conservar-se em determinado estado, com as mesmas características ao longo de um dado tempo. Este conceito está intimamente conectado com o de desempenho, que é o comportamento de um produto em serviço (em utilização), sob condições de real funcionamento ou uso, com pleno atendimento às exigências do usuário.

De acordo com Silva (2009), os danos nos pavimentos são causados pela passagem de veículos comerciais com frequência razoável, ressalta a existência de pesquisas com resultados satisfatórios, visando a utilização de RCD, tanto no aspecto econômico, quanto no técnico, que é uma destinação alternativa para esse material, reduzindo a necessidade de depósitos e, inclusive, preservando as fontes naturais.

A reciclagem na construção civil pode gerar inúmeros benefícios, como:

- redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos recicláveis (JOHN, 2000);
- redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de

resíduos pela reciclagem. Destaca-se aqui a necessidade da própria reciclagem dos resíduos de construção e demolição, que representam mais de 61% da massa dos resíduos sólidos urbanos (PINTO, 2005);

- redução do consumo de energia durante o processo de produção. Destaca-se a indústria do cimento, que usa resíduos de bom poder calorífico para a obtenção de sua matéria-prima (co-incineração) ou utilizando a escória de alto-forno, resíduo com composição semelhante ao cimento (JOHN, 2000);
- redução da poluição; por exemplo para a indústria de cimento que reduz a emissão de gás carbônico utilizando a escória de alto forno em substituição ao cimento Portland (JOHN, 1999);
- redução da poluição gerada pelo entulho e de suas consequências negativas ao ambiente como enchentes e assoreamentos de rios e córregos, além da preservação das reservas naturais de matéria-prima (ZORDAN, 2012).

O meio científico vêm desenvolvendo estudos e pesquisas para promover a utilização de produtos reciclados na pavimentação, tais como: reciclagem da camada asfáltica envelhecida, uso de escória de alto-forno e aciaria, uso de borracha reciclada de pneus e resíduos de construção civil, além da utilização de resíduos sólidos da decantação da matéria orgânica dos esgotos em concreto de cimento Portland e da borra de carbureto como aditivo melhorador de solo (PATRIOTA *et al.*, 2004).

## 2.6 CONSUMO DE AGREGADOS EM PAVIMENTAÇÃO

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro, os agregados são os materiais de construção mais utilizados no mundo (DNPM, 2012).

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 m<sup>2</sup> consome 21 toneladas de agregados; em habitações populares, uma unidade básica de 50 m<sup>2</sup>, consome 68 t; um edifício público de 1.000 m<sup>2</sup>, 1.360 t; uma escola padrão de 1.120 m<sup>2</sup>, 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.

Com relação às reservas, como a areia natural advém de processos intempéricos, que se estabelecem de maneira constante sobre rochas de todo o planeta, essas são consideradas recursos abundantes. Sua escassez só ocorre local ou regionalmente, justamente quando a demanda por esses materiais é muito alta, o que ocorre tipicamente em grandes aglomerados urbanos, como regiões metropolitanas, cada vez mais comuns. A Região Metropolitana de São Paulo é um exemplo bastante conhecido de crescente escassez, com a areia sendo trazida de outras regiões, com altos custos de transporte (DNPM, 2012).

Em 2011, a produção brasileira de areia alcançou 347 milhões de toneladas, das quais 17,4 milhões de toneladas, que equivalem a 5% do mercado brasileiro foram consumidas em pavimentação. No caso da produção brasileira de pedra britada no ano de 2011 foi de 268 milhões de toneladas, sendo 9% ou 24,1 milhões de toneladas destinadas à pavimentação (DNPM, 2012).

As estimativas de produções de areia natural, cascalho e rochas britadas (brita), agregados para construção civil, foram calculados a partir dos consumos de cimento e cimento asfáltico de petróleo no Brasil (DNPM, 2012).

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, 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, 2012).

## 2.7 AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO (ARC)

De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004), os agregados reciclados de concreto 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.

O ARC é originado de um dos materiais mais nobres e mais empregado na construção civil. Mesmo em países da União Europeia, com elevados índices de reciclagem, em média, menos de 20% do agregado natural é substituído pelo agregado reciclado. A maior parte do agregado reciclado produzido termina sendo aproveitado apenas em camadas de aterro e regularização (MUELLER, 2007 *apud* MIRANDA *et al.*, 2009).

Para utilizar o agregado reciclado de concreto deve ser verificada a qualidade, a qual não é assegurada apenas pela produção de um material limpo, britado e bem classificado granulometricamente. O material produzido deve ser adequado para seu uso específico e respeitar os limites de classificação determinados para aquele fim e cumprir ainda outras exigências como estabilidade e durabilidade.

Apesar de ser um material de potencial, os agregados reciclados de concreto (ARC) têm pouca investigação para a sua utilização em revestimento de pavimentos flexíveis.

Em 1977, no Japão foram propostas as primeiras normas para utilização de ARC. Depois de 1982 as normas ASTM C 32-82 e C126-79 incluíram o agregado graúdo reciclado de concreto nas especificações de agregados para concreto (Hansen, 1992). A partir da década de 80, normas e recomendações também entraram em vigor nos países baixos, na Dinamarca, Rússia e Alemanha, entre outros.

No Brasil o primeiro estudo sistemático para a utilização de resíduos de construção e demolição foi concluído por Pinto (1986). Sua pesquisa consistiu em estudar o uso do reciclado para produção de argamassas.

De acordo com John (2000), na maioria das normalizações internacionais os RCD são considerados inertes apenas devido a uma exceção à regra de classificação de resíduos (NBR 10004, ABNT). No entanto, devido à sua composição variada, os RCD podem conter resíduos perigosos, como adesivos, tintas, óleos, baterias, biocidas incorporados em madeiras tratadas, tendo sido encontrado nos lixiviados dos aterros quantidades de substâncias tóxicas acima dos limites, o que permite levantar a suspeita que esta exceção à regra pode ser revista em médio prazo. Até hoje ainda não se conhece estudo similar no Brasil.

A Associação de Reciclagem de Materiais de Construção dos Estados Unidos afirma que 140 milhões de toneladas de concreto são reciclados a cada ano. No Brasil, segundo dados da ABRELPE, são aproximadamente 31 milhões de toneladas. No entanto, muitos fatores econômicos impactam o fornecimento, incluindo os custos dos equipamentos, custos de transporte e taxas de aterros sanitários externos. A distância para o produtor do agregado em relação ao usuário de materiais reciclados (ou aterro sanitário) deve ser levado em conta na decisão do produtor de agregado para entrar no mercado. Assim, o grau de entrada do ARC em um mercado local vai depender da disponibilidade de materiais de demolição, a sua qualidade após o processamento, o nível de construção (especialmente a construção de estrada que são favorecidos para bases de estradas), os custos trabalhistas locais e taxas locais de aterro.

O uso de agregados reciclados em concretos demanda uma grande confiabilidade nas características dos agregados. Certamente o desenvolvimento deste mercado vai requerer melhorias na gestão do processo de reciclagem, nas ferramentas de controle de qualidade e na tecnologia de beneficiamento (ANGULO *et al.*, 2002). Algumas propriedades do ARC estão descritas a seguir.

#### 2.7.1 Massa específica

A massa específica dos agregados reciclados é inferior à dos agregados naturais. Segundo Hansen (1992), a massa específica do ARC é de 5 a 10% mais

baixa do que os agregados que o originaram devida à significativa presença de argamassa aderida.

A massa específica do agregado natural graúdo corresponde a  $2.700 \text{ kg/m}^3$  e o agregado miúdo é de  $2.590 \text{ kg/m}^3$ . Hasaba *et al.* *apud* Hansen (1992) encontraram a massa específica para agregado graúdo reciclado 25 a 5 mm cerca de  $2.430 \text{ kg/m}^3$ , independente da qualidade do concreto original. A massa específica correspondentes aos agregados miúdos reciclados inferiores a 5 mm foi  $2310 \text{ kg/m}^3$ .

Em outra investigação no Japão relatada por B.C.S.J *apud* Hansen (1992), a massa específica de agregados graúdos reciclados varia entre  $2.120 \text{ kg/m}^3$  e  $2.430 \text{ kg/m}^3$ , correspondentes à massa específica entre  $2.290 \text{ kg/m}^3$  e  $2.510 \text{ kg/m}^3$  para agregados miúdos reciclados a partir de uma ampla gama de concretos originais. A massa específica aparente correspondente para agregados graúdos reciclados de  $1.970 \text{ kg/m}^3$  a  $2.140 \text{ kg/m}^3$  e agregados miúdos reciclados variando de 2.190 a  $2.320 \text{ kg/m}^3$ .

Pode-se concluir que a massa específica do agregado reciclado é um pouco menor do que a massa específica do agregado original devido à presença da argamassa que é ligada à superfície das partículas de agregados originais. As massas específicas dos agregados reciclados de concreto devem ser determinadas em laboratório antes de qualquer projeto de mistura de concreto asfáltico com agregado reciclado.

### 2.7.2 Absorção

Segundo Carneiro *et al.* (2001), a absorção de água é uma das diferenças mais marcantes entre agregado natural e agregado reciclado. A faixa de valores típicos de absorção dos ARC de acordo com Saed *et al.* (2007) varia de 2% a 6% para agregados reciclados graúdos e de 4% a 8% para agregados miúdos.

Nixon *apud* Hansen (1992) concluiu que a diferença mais marcante em propriedades físicas de agregados reciclados de concreto em comparação com agregados naturais é a maior absorção de água. Hansen e Narud *apud* Hansen (1992) encontraram absorções de água dos agregados reciclados graúdos que vão a partir de 8,7% para o material 4 a 8 mm e 3,7% para material 16 a 32 mm,

independentemente da qualidade do concreto original. Correspondentes absorções de água de agregados naturais variaram de 3,7% a 0,8%.

Narud *apud* Hansen (1992) encontraram uma absorção de água de 9,8% para um agregado reciclado miúdo produzido a partir de um concreto original com uma relação água-cimento igual a 0,70. Hasaba *et al. apud* Hansen (1992) encontraram absorções de água em torno de 7% agregados reciclados graúdos, independentemente da qualidade de concretos originais. Absorção correspondente para agregados miúdos reciclados foram cerca de 11%.

Em outra investigação relatada por B.C.S.J. *apud* Hansen (1992), foram encontradas absorções de água dos agregados graúdos reciclados entre 3,6% e 8,0% e absorções de água de agregados miúdos reciclados entre 8,3% e 12,1%. Resultados semelhantes foram obtidos por Ravindrarajah, Tam e por Karaa *apud* Hansen (1992). Pode-se concluir que a absorção de água de agregados reciclados é muito maior do que a absorção de água de agregados naturais.

Outra característica do agregado reciclado de concreto é a argamassa aderida. Quando o mesmo é britado, certa quantidade do volume de argamassa antiga permanece ligada às partículas no agregado reciclado, como relatado por Narud *apud* Hansen (1992) que encontraram a porcentagem de volume de argamassa aderida a brita entre 25% e 35% para faixas 16 a 32 mm e cerca de 40% para as faixas 8 a 16 mm e ainda cerca de 60% para faixa de 4 a 8 mm.

A presença de pasta de cimento aderida a brita aumenta a porosidade dos agregados, reduzindo a densidade e a resistência à abrasão do agregado reciclado de concreto e aumenta a capacidade de absorção de água (PARANAVITHANA, 2006).

Na (Tabela 10) estão relatados resultados de algumas propriedades do ARC em diversas pesquisas.

TABELA 10: RESULTADOS DE PROPRIEDADES DE ARC EM PESQUISAS.

Pesquisador	Gradação	Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Massa submersa (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção (%)
Hasaba <i>et al.</i> <i>apud</i> Hansen (1992)	Graúdo	N/A	N/A	2430	7
	Miúdo	N/A	N/A	2310	11
BSCJ <i>apud</i> Hansen (1992)	Graúdo	1970 a 2140	N/A	2120 a 2430	3,6 a 8
BSCJ <i>apud</i> Hansen (1992)	Miúdo	2190 a 2320	N/A	2290 a 2510	8,3 a 12
Paranavithana (2006)	Graúdo	2706	2471	2333	5,9
Paranavithana (2006)	Miúdo	2798	2735	2701	1,3
Shen <i>et al.</i> (2011)	Graúdo	N/A	N/A	2320	9,68
Agrela <i>et al.</i> (2011)	Graúdo	N/A	2400	N/A	5,42
Arabani <i>et al.</i> (2012)	Graúdo	2457	2471	2484	N/A
Arabani <i>et al.</i> (2012)	Miúdo	2463	2477	2496	N/A
Marinho (2011)	Graúdo	N/A	N/A	2346	4,25

FONTE: AUTORA

### 2.7.3 Perda por abrasão Los Angeles

Hansen e Narud *apud* Hansen (1992) encontraram no ensaio Abrasão Los Angeles percentagens de perda que variam de 22,4% para faixas granulométricas de 16 a 32 mm de agregado graúdo reciclado produzido a partir de um concreto de alta resistência, para 41,4% para faixa granulométrica de 4 a 8 mm de agregado graúdo reciclado produzido a partir de um concreto de baixa resistência.

B.C.S.J. *apud* Hansen (1992) encontraram no ensaio abrasão Los Angeles percentagens de perda que variam de 25,1% para 35,1% para os agregados graúdos reciclados a partir de 15 concretos de classes de resistências muito diferentes, que foram esmagados de diferentes maneiras. Yoshikane *apud* Hansen (1992) encontrou percentagens de perda Los Angeles variando de 20,1% para um agregado graúdo reciclado de 13 a 5 milímetros produzido a partir de uma classe de resistência elevada do concreto original (40 MPa) a 28,7% para um agregado reciclado 13 a 5 mm produzido a partir de um concreto original baixa resistência (16 MPa). Resultados semelhantes foram encontrados por Ravindrarajah e Tam citados por Hansen (1992).

De acordo com a Designação ASTM C 33, podem ser utilizados para a produção de concreto de cimento portland, agregados reciclados quando o valor de abrasão Los Angeles não exceda 50%. Agregado para bases e sub-bases utilizadas

em pavimentos é necessário que os valores de perda de Los Angeles não sejam superiores a 40%.

## 2.8 CONCRETOS BETUMINOSOS USINADOS A QUENTE - CBUQ

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 são apresentados parâmetros preconizados pelo DNIT para concreto asfáltico nas especificações de serviço DNIT 031/2006 – ES.

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 visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Na dosagem do concreto betuminoso podem ser usados vários métodos como, por exemplo: Marshall, Hveem e mais recentemente a metodologia Superpave.

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, 1996).

As tensões que ocorrem durante o ensaio para determinação da estabilidade e fluência são de difícil interpretação, há diversidade de procedimentos no preparo das amostras e conseqüentemente a dispersão nos resultados é muito grande (MOTTA *et al.*, 1993).

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 (Vv) e relação betume/vazios (RBV).

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.

Os estudos do SHRP sobre materiais utilizados em pavimentos asfálticos, realizado entre 1987 e 1993, forneceram resultados que foram agrupados e patenteados sob a denominação Superpave, contou com a participação de 22 países, inclusive o Brasil (SHRP, 1993).

Os especialistas do SHRP identificaram propriedades dos agregados importantes para a pavimentação, contudo propriedades também de extrema importância para o bom desempenho dos pavimentos tais como forma e textura superficial do agregado graúdo, densidades, porosidade e absorção não foram consideradas. O critério de escolha dos ensaios para a análise dos agregados foi baseado apenas nos ensaios mais comumente utilizados pelas agências rodoviárias dos Estados Unidos, esse critério desconsidera ensaios utilizados em outros países, já consagrados por apresentarem bom resultados, que poderiam ser utilizados para análise das propriedades de maneira mais eficaz. Como exemplos podem ser citados os ensaios padronizados pela BS 812 (British Standard, 1990) muito usados

na Europa e na Austrália para determinação da forma do agregado graúdo (KHANDAL *et al.*, 1998).

Em 2003, a FHWA -*Federal Highway Administration National* fez uma revisão com o objetivo de capturar técnicas para a implantação dos usos mais avançados de agregado reciclado de concreto (ARC) e depois transferir o conhecimento para todos os Órgãos Estaduais de Transporte. Segundo consta, os seus usos ou aplicações específicas foram identificados, juntamente com suas barreiras e benefícios para a implementação, bem como especificações, práticas de construção e os desafios de implementação foram documentados. A equipe de revisão é composta pela FHWA, EPA, um representante da AASHTO e um representante da *American Concrete Institute*.

Alguns questionamentos foram feitos aos participantes desta revisão como:

- Está testando ciclo gelo-degelo (ASTM C 666) realizado no concreto original e na mistura com ARC proposta? Qual o método de teste é usado?
- Que tipo de ensaio de durabilidade do agregado é realizado em ARC? Os resultados são comparáveis aos testes realizados em misturas virgens?
- Como o uso de ARC impacta na demanda de asfalto da mistura?
- Foi investigado o impacto do ARC sobre o potencial de extração de CBUQ?
- O uso de ARC impacta nas propriedades volumétricas da mistura CBUQ?
- Houve algum problema durante a pavimentação que tenha causado um efeito adverso sobre a compactação, aplicação e acabamento do concreto asfáltico com ARC?

Estes questionamentos feitos aos pesquisadores apontam algumas dificuldades encontradas para o uso do ARC em CBUQ, o desconhecimento das propriedades do ARC que podem impactar no CBUQ bem como com relação à durabilidade do CBUQ produzido com ARC.

Esta pesquisa revelou como as agências de rodovias estaduais estão usando ARC, estabeleceu uma linha de base para a adoção ARC futuro, e os perfis dos usos mais avançados da ARC em cinco estados: Minnesota, Utah, Virgínia, Texas e Michigan. ARC é utilizado em todo os EUA como material de base, mas raramente é usado como agregado em CBUQ. Muitas vezes o ARC tem grandes

quantidades de contaminantes e deve ser ainda processado, o que adiciona custos. Um estudo de quatro anos sobre formas de detectar e mitigar o uso de ARC foi concluído em 2004 no *Center of Recycled Materials Research* da Universidade de New Hampshire. A FHWA descobriu que rotineiramente o concreto está sendo reciclado pelas estradas dos Estados Unidos, e sua principal aplicação tem sido como material de base. Porém, a utilização de agregado reciclado de concreto como agregado no CBUQ não é tão amplamente aceita nos Estados Unidos. Entre as conclusões deste programa:

- no Texas, ARC é licitado como uma opção em contratos de construção. Para concreto não estrutural podem ser utilizados 20% de agregados reciclados e como um material de base podem ser utilizados 100% de agregados reciclados;
- Virginia usa ARC na base, sub-base e aterros. Um exemplo de uso ARC em sub-base é o projeto I-66, que ganhou o Prêmio Nacional de pavimentação de concreto após a conclusão;
- Michigan permite o uso de ARC como agregado graúdo para meio-fio e sarjeta, calçada, barreiras de concreto, calçadas, pavimentação temporária. O ARC também é permitido como agregado graúdo na mistura quente de asfalto. ARC foi amplamente utilizado na estrutura do pavimento durante os anos 1980. No entanto, em 1991, uma moratória foi estabelecida para o uso de ARC em pavimento de concreto.

## 2.9 AGREGADOS PARA USO EM CBUQ

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 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 031/2006 – 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.

O tamanho máximo do agregado interfere de várias formas no comportamento das misturas asfálticas. Caso o tamanho máximo do agregado seja excessivamente pequeno, a mistura poderá apresentar instabilidade. Do contrário, quando o tamanho máximo do agregado é excessivamente grande, tende a dificultar a trabalhabilidade da mistura podendo provocar também sua segregação (BERNUCCI *et al.*, 2007).

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, indicativo 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 FHWA – *Federal Highway Administration* 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.

Segundo Ahlrich (1996), 85% do volume total do CBUQ consiste de agregados e são fortemente influenciados por suas propriedades.

A quantidade de agregado mineral em misturas asfálticas de pavimentação é geralmente de 90 a 95% em peso e 70 a 85% em volume e esta parcela mineral é composta de 40% de agregado miúdo (0 a 5 mm) e 60% de agregados graúdos (6 a 12 mm), que são em parte responsáveis pela capacidade de suporte de cargas dos revestimentos, influenciando assim o desempenho dos pavimentos (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

Topal (2006) sugere que a mistura asfáltica contenha 90-95% em peso de agregados e 75-85% por volume de agregados minerais.

### 2.9.1 Características do agregado para uso em CBUQ

Segundo Roberts *et al.* (1996) *apud* Bernucci *et al.* (2007) são as propriedades físicas dos agregados que determinam principalmente a adequação para o uso em misturas asfálticas e em menor extensão as propriedades químicas. São propriedades físicas e mecânicas básicas resistência, porosidade e a densidade.

São descritas a seguir as características que são analisadas para aceitação de agregados para misturas asfálticas segundo a maioria das especificações especialmente as do DNER / DNIT.

- tamanho e graduação: a espessura mínima de execução de uma camada de concreto asfáltico determina o tamanho máximo do agregado usado nesta mistura;
- limpeza: alguns agregados contém certos materiais deletérios tais como: vegetação, conchas, grumos de argila presentes sobre a superfície, as

especificações apresentam limites aceitáveis para a presença destes materiais. A limpeza dos agregados pode ser verificada visualmente, mas uma análise granulométrica com lavagem é mais eficiente;

- resistência à abrasão: agregados localizados próximos ou na superfície do pavimento devem apresentar resistência à abrasão maior do que os localizados nas camadas inferiores. A tenacidade e a resistência abrasiva são tratadas por algumas normas brasileiras;
- textura superficial: à medida que aumenta a rugosidade do agregado, há uma tendência de perda de trabalhabilidade da mistura asfáltica e de crescimento da resistência ao cisalhamento dessa mistura bem como do teor de ligante do projeto,
- forma das partículas: a forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade;
- absorção: é indicada pela quantidade de água que o agregado absorve quando imerso, um agregado poroso irá absorver ligante asfáltico consumindo parte do ligante que dá a coesão a mistura, para compensar este fato, deve-se incorporar quantidade adicional de ligante;
- adesividade ao ligante asfáltico: o efeito da água pode separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado e torná-lo inaceitável para o uso em misturas asfálticas. Esse agregado é denominado hidrófilo e os agregados com alta adesividade em presença de água são denominados hidrofóbicos e são aceitáveis para a utilização em misturas asfálticas;
- sanidade: a característica do agregado de resistência a desintegração química é quantificada através deste ensaio;
- densidade específica e/massa específica: no estudo dos agregados são definidas três designações de massa específica: real ( $G_{sa}$ ), aparente ( $G_{sb}$ ) e efetiva ( $G_{se}$ ), quando se usa o sistema internacional de unidades, massa

específica e densidade possuem o mesmo valor numérico.

### 2.9.2 Caracterização dos agregados segundo o SHRP

Pesquisadores deste grupo identificaram duas categorias de propriedades que devem ser respeitados para uso de agregado em misturas asfálticas: propriedades de consenso e propriedades de origem.

As propriedades de consenso pelos pesquisadores do SHRP são aquelas de exigência fundamental para o bom desempenho dos revestimentos asfálticos: angularidade do agregado graúdo e miúdo, partículas alongadas e achatadas e teor de argila. Os critérios de aceitação são baseados no nível de tráfego, referido ao número equivalente de passagens de eixo padrão (N) determinado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e pela posição na estrutura do pavimento em que vai ser empregado o agregado, ou seja, mais próximos à superfície e sujeitos a tráfego intenso demandam valores de propriedades de consenso mais restritivos (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Segundo Bernucci *et al.* (2007), as propriedades de origem dependem da origem do agregado, seus valores limites para aceitação são definidos localmente pelos órgãos ou agências. Essas propriedades são a resistência abrasão, a sanidade e a presença de materiais deletérios.

### 2.9.3 Normas nacionais e internacionais para uso de agregados em CBUQ

Citado por Silva (2009) foi após 1982 nos EUA que as normas ASTM C33-82 e ASTM C125-79 criaram condições para utilização de agregado reciclado de demolição em pavimentação. Na (Tabela 11) estão listadas algumas normas e procedimentos para controle e aceitação dos agregados em pavimentação.

TABELA 11: ENSAIOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS - LIMITES PARA ACEITAÇÃO DE AGREGADOS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO.

Ensaio	Normas	AASHTO	ASTM	DNER DNIT	Especificação WSDOT
Abrasão Los Angeles	AASHTO T96 ASTM 131 ASTM C535 DNER-ME 035/98	Máximo 30%	35 a 45%	40-55%	Máximo 30%
Sanidade	AASHTO T104 ASTM C88 WSDOT T 113 DNER-ME 089/94	10-20	10-20	Perda máxima 12%	Máximo 30
Lamelaridade, partículas alongadas e achatadas	ASTM D4791 ASTM D3398/06 WSDOT/FOP	-	Máximo 10%	-	Máximo 10%
Índice de forma	NBR 6954/89 DNER-ME 086/94	-	-	Min 0,5	-
Equivalente de areia (teor de argila)	ASTMD2419 WSDOT/FOP ASTHO T 176 DNER-ME 054/97	Min.45%	40 a 50%	55%	Min.45%
Angularidade agregado miúdo	AASHTO T304 ASTM C1252/06	Min.40%	40%	-	Min.40%
Massa específica agregado graúdo/Absorção	ASTM C127/93 AASHTO T85 DNER-ME 081/98 NBR NM 53/2003	Variável	Variável	Variável	N/A
Massa específica agregado miúdo/Absorção	ASTMC128/93 AASHTO T84/ DNER-ME 084/95 NBR NM52/2003	Variável	Variável	Variável	N/A
Massa específica aparente	DNER-ME 093/94	-	-	-	-
Gradação	DNER-ME 083/98 ASTM C 136-96 a	-	-	-	-
Adesividade	DNER-ME 078/94 DNER-ME 079/94 ASTMD1075 ASTM D-4867 AASHTO T283(Lottman) NBR 15617	Perda menor que 30%		Perda menor que 25%	

FONTE: AUTORA

A norma inglesa BS EN 13043 (British Standard, 2002) para a especificação de agregados para uso em asfalto foi introduzida em 2004 no mercado do Reino Unido. Esta norma especifica agregados em termos de requisitos técnicos ao lado de métodos de ensaio pertinentes. Portanto, materiais reciclados que são destinados para uso em misturas asfálticas estão sujeitos aos mesmos requisitos para a classificação das propriedades e testes dos agregados virgens. Pesquisadores estão agora responsáveis por definir as propriedades de agregados

relevantes para suas aplicações específicas, bem como aferição da indústria extrativa e de fornecedores de outros materiais. Requisitos selecionados para agregados em revestimento de asfalto e bases são mostrados na (Tabela 12).

TABELA 12: PROPRIEDADES PARA AGREGADOS UTILIZADOS EM CBUQ PELA NORMA EUROPEIA BS EN 13043 (BIRD, 2007).

Categoria de propriedade	Método de teste	'Requisitos de propriedades
Geométrico	BS EN933	Classificação, teor de finos, índice forma
Físicas e mecânicas	BS EN1097	Resistência à fragmentação, polido (PSV), abrasão (AAV)
Químico	BS EN1744	Lixiviação
Térmica e intemperismo	BS EN1367	Absorção de água, valor sulfato de magnésio

Na Tabela 13 são apresentados alguns resultados de ensaios internacionais para agregado reciclado de concreto.

TABELA 13: RESULTADOS E NORMAS INTERNACIONAIS PARA ARC (WEN E BHUSAL, 2011).

Ensaio	Norma	Natural	ARC1	ARC2	Especificação WSDOT
Abrasão Los Angeles	AASHTO 96	20	22	24	Máximo 30
Sanidade	WSDOT 113	61	15	13	Máximo 30
Faces fraturadas	WSDOT/FOP/AASHTO TP 61	95%	96%	93%	Mínimo 90%
Lamelaridade agregado graúdo	WSDOT/FOP/ASTM D4791	3%	1%	0,5%	Máximo 10%
Equivalente de areia	WSDOT/FOP/ for ASTHO T 176	90%	75%	80%	Min.45%
Angularidade	AASHTO T304 and ASTM C1252	45%	42%	41%	Min.40%
Massa específica agregado graúdo	AASHTO T85	2675	2412	2427	N/A
Massa específica agregado miúdo	AASHTO T84	2686	2092	2125	N/A

Para os agregados que apresentarem valores acima do limite superior de 55% do ensaio Abrasão Los Angeles, o DNER passou a recomendar a execução de outros ensaios, a indicação destes ensaios foi sugerida em pesquisa do IPR-DNER (IPR, 1998). Estes ensaios estão listados na (Tabela 14).

TABELA 14: ENSAIOS NACIONAIS PARA DETERMINAÇÃO DE TENACIDADE E RESISTÊNCIA À ABRASÃO (BERNUCCI *ET AL.* 2007).

Métodos de Ensaio	Valores limites - Tentativa
DNER-ME 35/98 – Agregado- determinação da abrasão Los Angeles	LA ≤ 65%
DNER-ME 399/99 – Agregados- determinação de perda ao choque no aparelho de Treton	T ≤ 60%
DNER-ME 96/98 – Agregado graúdo- avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% dos finos	10% finos ≥ 60 kN
DNER-ME 401/99 – Agregado- determinação do índice de degradação de rochas após a compactação Marshall, com ligante – IDML e sem ligante IDM	IDML com ligante ≤ 5 IDM sem ligante ≤ 8
DNER-ME 398/99 – Agregados- determinação do índice de degradação após compactação Proctor-IDP	IDP ≤ 6
DNER-ME 397/99 – Agregado- determinação do índice de degradação Washington- IDW	IDW ≤ 30
DNER-ME 197/97 ou NBR 9938 Agregados - determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos	E ≥ 60

Foram encontradas várias normas e especificações para o uso do agregado reciclado de concreto em bases, sub-bases ou em pavimentos de concreto, porém poucas especificações exclusivas para o uso do ARC em CBUQ, o que norteia sua aplicação são as especificações já existentes para o agregado natural. Isto indica uma possível lacuna a ser preenchida com o uso de agregados reciclados de concreto em CBUQ.

## 2.10 EXPERIÊNCIAS DO USO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO EM CBUQ

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 cumprirem.

A *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 19 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.

Frota *et al.* (2004) conduziram ensaios, em Manaus, para verificar a possibilidade de uso do agregado reciclado de demolição 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.

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 (CCR). A mistura de referência foi realizada com micaxisto (agregado natural da região). Concluiu que o desgaste por abrasão Los Angeles especificado na norma DNER-ME 035/98 do ARC, 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 estavam adequados para uso em misturas betuminosas.

Frota *et al.* (2005) avaliaram a fluência de misturas asfálticas com agregados reciclados e CAP 50-70. 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).

Outro trabalho de pesquisa de Paravithana e Mohajerani (2006) sobre os efeitos dos agregados reciclados nas propriedades do concreto asfáltico mostrou que, com exceção do percentual de vazios de ar, todas as propriedades volumétricas de uma mistura asfáltica com ARC graúdo, o módulo de resiliência e os valores de fluência foram menores para o CBUQ com ARC do que para uma mistura projetada totalmente com agregados naturais convencionais.

Topal *et al.* (2006) concluíram que o ARC pode ser substituído em CBUQ e alcançar resultados desejáveis para estabilidade Marshall e um aumento na

resistência a tração indireta. Utilizou diferentes porcentagens de ARC (10, 20 e 30%) em CBUQ.

Wong *et al.* (2007) estudaram a aplicabilidade da substituição parcial de agregados naturais por ARC em CBUQ em Singapura. Foram estudadas 3 misturas com ARC: 6%, 45% sem tratamento e 45% tratado termicamente o ARC. Todas as três misturas passaram nos critérios de desgaste especificados pela Autoridade de Transportes Terrestres de Singapura. Com base no método Marshall os testes de desempenho da mistura com ARC apresentaram comparáveis módulo de resiliência e fluência para aqueles da mistura com agregados naturais. As misturas com a maior porcentagem de ARC apresentaram maior módulo de resiliência e resistência à fluência.

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). Os estudos de Ron *et al.* (2008) concluíram que:

- 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 filer proveniente do ARC por carbonato de cálcio. O volume de vazios chegou a apenas 2% quando se usou 80% de carbonato de cálcio e 20% de filer de ARC;
- 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 que o CBUQ produzido com agregado natural. Este resultado geralmente é utilizado como parâmetro indicador da vida de fadiga das misturas. Considera-se que valores

menores são mais indicados 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.

Mills-Beale *et al.* (2009) exploraram métodos mais rápidos e melhores técnicas ou abordagens na determinação da massa específica e absorção de agregados miúdos e graúdos reciclados de concreto usando o equipamento *SSDetect* e métodos de saturação de vácuo. Esses métodos têm se mostrado um grande potencial para a expedição do teste de ARC e outras problemáticas de agregados miúdos e graúdos, como fíler mineral e agregados de angularidade alta. Os investigadores estão atualmente realizando trabalhos sobre ARC, sobre massa específica e absorção para aumentar o conhecimento na caracterização do ARC.

Soares *et al. apud* Silva (2009) conduziram ensaios de comportamento mecânico de agregado reciclado de demolição para verificar a possibilidade de uso do agregado reciclado isento de materiais cerâmicos e gesso no próprio revestimento asfáltico. Em suas conclusões, salientam que os agregados reciclados apresentam boas características atendendo às especificações na maioria dos aspectos. Em sua pesquisa o agregado reciclado apresentou valor de Abrasão *Los Angeles* melhor que a brita convencional.

Silva (2009) estudou as características mecânicas de misturas feitas com o agregado reciclado de demolição para uso em misturas asfálticas destinadas a vias urbanas com baixo volume de tráfego. Utilizou para a dosagem a metodologia Marshall, enquadrando as misturas na faixa B e C, utilizou CAPs 30/45 e 50/70 e

analisou o comportamento das misturas concluindo que o agregado reciclado pode ser utilizado em mistura asfáltica para tráfego leve.

Mills-Beale *et al.* (2010) realizaram um estudo para investigar a viabilidade do uso de ARC para um baixo volume de tráfego rodoviário em Michigan, utilizando substituições de 25%, 35%, 50% e 75% de agregados naturais pelo ARC e ligante 60/70, com o aumento dos valores de ARC verificaram a diminuição do VAM das misturas. Os resultados dos testes dinâmicos mostraram que a rigidez das misturas com ARC eram menores do que da mistura de controle. Para os testes de suscetibilidade umidade, todas as misturas, com exceção da ARC a 75%, passou a proporção da força de tração de 80%. Os testes de energia de compactação mostraram que a utilização do ARC no CBUQ reduziu a energia necessária para a compactação. Os objetivos desta pesquisa foram determinar a viabilidade do uso de ARC em CBUQ, avaliou os efeitos do ARC com método de dosagem Superpave, comportamentos de desempenho de CBUQ como trincas por fadiga, térmico e suscetibilidade à umidade.

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.

Chen *et al.* (2011) avaliaram o potencial de uso do pó, que é um subproduto da produção de ARC, como fíler para CBUQ, 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. A utilização de pó como material de enchimento no CBUQ pode melhorar a sensibilidade à água em alta temperatura e vida de fadiga. No entanto, o pó reciclado de concreto pode causar uma diminuição do desempenho à baixa temperatura da mistura de asfalto. Mas seu desempenho à

baixa temperatura ainda satisfaz os requisitos de especificações de construção do pavimento da China. O pó utilizado como material de enchimento em mistura de asfalto é viável, especialmente em regiões quentes.

Marinho (2011) estudou o uso de agregados reciclados de concreto 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, a pesquisadora concluiu 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.

Weng e Bhusal (2011) em Washington estudaram cinco diferentes percentuais de substituição do agregado natural pelo ARC (20, 40, 60, 80 e 100%). A mistura de controle foi realizada com 100% de agregado natural. Concluíram que o uso de ARC nas misturas baixam a densidade específica da mistura e todas as misturas passaram nos requisitos das propriedades de agregados para asfalto do WSDOT que utiliza para suas especificações normas ASTM e AASHTO.

Zhu *et al.* (2011), na China, estudaram o uso de agregados reciclados de demolição de estruturas danificadas por terremoto em concreto asfáltico. Devido a absorção elevada de agregados reciclados, foi utilizada uma resina de silicone líquido para pré-tratamento do agregado reciclado. O agregado reciclado utilizado nesta pesquisa continha cerca de 71,20% de resíduos de concreto (ARC), seguido por 26,16% de resíduos do tijolo e 2,30% de resíduos de cerâmica. Após pré-tratamento dos agregados reciclados, o valor abrasão Los Angeles, massa específica aparente, absorção de água e adesão com asfalto foram testados de acordo com as normas chinesas JTG E42-2005 e 052-2000. A norma JSM-5610LV SEM foi utilizada para investigar a morfologia da superfície pré-tratada do agregado reciclado, um espectrômetro (Nexus, feito pela Thermo Nicolet Co. Ltda. dos EUA) foi utilizado para investigar a estrutura química da resina de silicone. Os resultados

experimentais indicaram que o pré-tratamento de agregado reciclado por resina de silicone melhorou a resistência, a absorção, a adesão com asfalto e a morfologia da superfície do agregado reciclado. A introdução de agregado reciclado teve um impacto negativo efeito sobre a resistência à umidade e na flexibilidade em baixa temperatura. No entanto, o autor afirma que o pré-tratamento pode melhorar estas propriedades. No que diz respeito aos índices mecânicos, tais como o valor de abrasão Los Angeles, o agregado reciclado graúdo tem valores mais elevados do que agregado graúdo natural, que mostra baixa resistência à abrasão dos agregados reciclados graúdos. As diferenças das propriedades do agregado fino são muito pequenas, exceto para absorção de água. As propriedades testadas como a absorção água e abrasão Los Angeles não passaram pelas exigências da especificação da China para agregados naturais, portanto para que todas as propriedades do agregado reciclado atendessem os requisitos da especificação da China para o agregado natural, os agregados foram pré-tratados.

Os elementos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{CaCO}_3$  ( $\text{CaO}$  e resultado da perda a partir de  $\text{CaCO}_3$ ) são os principais componentes do agregado reciclado utilizado na pesquisa de Zhun *et al.* (2011). Ambos os resultados XRF e DRX provaram que a composição do agregado reciclado é mais complexa do que a de agregado de calcário natural. Esta complexidade tem uma estreita relação com a fonte de agregado que irá influenciar as propriedades de mistura de asfalto contendo agregado reciclado. O pré-tratamento de agregado reciclado por resina de silicone melhora o valor da abrasão Los Angeles e absorção de água, mas causa relativamente menor massa específica aparente.

Nesta pesquisa de Zhu *et al.* (2011), o pré-tratamento de agregado graúdo reciclado banhado por resina de silicone diminuiu a absorção de asfalto da mistura em 88,8%. O pré-tratamento de agregado reciclado banhado em resina de silicone melhorou a resistência, a absorção, aderência com o asfalto e morfologia da superfície do agregado reciclado, devido à grande penetração, a hidrofobicidade e aderência. Porém concluíram que a introdução de agregado reciclado provoca baixa resistência a umidade e flexibilidade em baixas temperaturas e que a substituição com agregado reciclado pré-tratado melhora essas propriedades, mas tem efeito negativo sobre a deformação permanente da mistura de asfalto a alta temperatura.

Finalmente concluem que a utilização de resíduos em mistura asfáltica é tecnicamente viável com a substituição de agregado natural por agregado reciclado e do pré-tratamento de agregado reciclado graúdo com resina líquida de silicone.

Arabani *et al.* (2012) estudaram propriedades mecânicas de misturas asfálticas com agregados reciclados de concreto e agregados de escória de aciaria. Seis misturas de asfaltos contendo três tipos de agregados (agregados naturais, agregado reciclado de concreto e agregado de escória de aciaria) foram utilizados na dosagem Marshall para determinar o teor ótimo de ligante asfáltico. As características mecânicas das misturas foram avaliadas e os resultados indicaram que a melhor mistura era a que continha agregados graúdos reciclados de escória de aciaria com agregados miúdos reciclados de concreto. As seis misturas asfálticas (referência, FA: RCA, CA: RCA, FA: SS, CA: SS e FA: RCA + CA: SS) contendo 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5% e 7,0% de teor de ligante asfalto, em massa do agregado foram preparados para determinar o ótimo teor de ligante. Os resultados indicaram que o ótimo teor de ligante de 5,1%, 5,6%, 6,5%, 5,3%, 5,5% e 5,9%, respectivamente.

Segundo Wen e Bhusal (2011), podem ser vistos na (Tabela 15) que os resultados de misturas asfálticas utilizando RCD são inconsistentes e em grande parte depende da origem e característica do RCD utilizado. Além disso, os testes laboratoriais empregados por estudiosos anteriores podem não representar verdadeiramente o desempenho das misturas em campo.

TABELA 15: RESULTADOS DE PESQUISAS UTILIZANDO RCD EM CBUQ (WEN E BHUSAL, 2011).

Pesquisador	RCD (%)	Resistência à abrasão	Módulo de Resiliência	Módulo Dinâmico	Módulo de elasticidade	Resist. à tração indireta	Estabilidade Marshall
Wong <i>et al.</i> (2007)	6 a 45	N/A	Aumentou	N/A	N/A	N/A	N/A
Paranavithana <i>et al.</i> (2006)	50	Reduziu	Reduziu	N/A	N/A	N/A	N/A
Topal <i>et al.</i> (2006)	10,20 e 30	N/A	N/A	N/A	N/A	Aumentou	N/A
Beale <i>et al.</i> (2010)	25,35, 50 e 75	Reduziu	N/A	Reduziu	N/A	N/A	Aumentou

N/A: Não avaliado

## 2.11 PROPRIEDADES DO CBUQ COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

De acordo com Gouveia (2006) as propriedades volumétricas das misturas asfálticas são requisitos necessários para um desempenho adequado dos pavimentos. Para agregados que não apresentam absorção, valores corretos dos parâmetros volumétricos das misturas: Volume de Vazios ( $V_v$ ), Vazios do Agregado Mineral (VAM) e Relação Betume-Vazios (RBV); podem ser facilmente calculados, pois os valores das densidades do agregado (aparente, real e efetiva) são teoricamente iguais. Entretanto, quando o agregado possui algum grau de absorção, o valor obtido para cada parâmetro volumétrico passa a depender da densidade utilizada e da quantidade de asfalto absorvido pelo agregado. Ao fazer uso das densidades do agregado incorretamente, pode-se assumir que uma porção ou toda a porosidade do agregado está inclusa no  $V_v$  da mistura, o que ocorre quando se utiliza a densidade real, ou que o asfalto absorvido está preenchendo os vazios entre as partículas de agregados na mistura, o que ocorre quando se utiliza a densidade aparente para o cálculo do  $V_v$ . A densidade do agregado e a absorção de asfalto exercem grande efeito nos parâmetros volumétricos, além de influenciar diretamente o teor de asfalto efetivo da mistura, sendo, portanto, imperativo que esses dois fatores sejam cuidadosamente considerados nos projetos de misturas, para que os parâmetros utilizados como critério de projeto sejam calculados corretamente. As propriedades volumétricas das misturas asfálticas podem ser classificadas em parâmetros volumétricos primários e secundários, empregando-se a nomenclatura utilizada pelo *Asphalt Institute* e adotada pelo Superpave.

### 2.11.1 Parâmetros volumétricos primários

De acordo com Gouveia (2006) os parâmetros volumétricos primários estão relacionados diretamente com os volumes relativos dos componentes individuais das misturas: volume de ar ( $V_{ar}$ ), volume de agregados ( $V_{ag}$ ), volume de asfalto ( $V_b$ ). Devido ao fenômeno da absorção de asfalto pelo agregado, uma porção do agregado e do asfalto (absorvido) passa a compartilhar o mesmo espaço, ou seja, a soma dos volumes ( $V_b + V_{ag}$ ) é maior do que os seus volumes combinados ( $V_{b+ag}$ ). Isso leva a uma subdivisão dos parâmetros volumétricos primários em:

- Volume de asfalto efetivo ( $V_{bef}$ ): asfalto não absorvido pelo agregado;
- Volume de asfalto absorvido ( $V_{ba}$ ): asfalto dentro dos poros do agregado;
- Volume aparente do agregado ( $V_{ap}$ ): inclui o volume dos poros permeáveis à água e ao asfalto;
- Volume efetivo do agregado ( $V_{ef}$ ): inclui o volume dos poros permeáveis à água, mas não ao asfalto;
- Volume real do agregado ( $V_r$ ): não inclui o volume dos poros permeáveis à água ou ao asfalto.

### 2.11.2 Parâmetros volumétricos secundários

Segundo Gouveia (2006) desde a década de 50, outros três parâmetros volumétricos vêm sendo amplamente utilizados, classificados como parâmetros volumétricos secundários por serem calculados com base nos parâmetros volumétricos primários:

- Volume de Vazios,  $V_v$ : volume de ar ( $V_{ar}$ ) existente entre as partículas do agregado envoltas pelo filme de asfalto, expresso como uma porcentagem do volume total da mistura compactada;
- Vazios do Agregado Mineral, VAM: soma do volume de vazios ( $V_v$ ) e do volume de asfalto efetivo ( $V_{be}$ ), expresso como uma porcentagem do volume total da mistura compactada;
- Relação Betume-Vazios, RBV: grau em que os VAM são preenchidos por asfalto, expresso em porcentagem.

Gouveia (2006) aponta que a dificuldade, no entanto, está na seleção do valor da densidade do agregado que deve ser empregada no cálculo dos parâmetros volumétricos secundários, para que valores realísticos sejam encontrados. Deve-se ter em mente que a densidade não pode ser vista apenas como uma variável isolada, porque o valor escolhido para esse fator tem um grande efeito nos parâmetros volumétricos secundários e influencia diretamente o teor de asfalto efetivo da mistura. O processo de escolha da densidade não é simples, pois uma

densidade do agregado não é suficiente para o cálculo dos parâmetros volumétricos e, analisando-se o volume ocupado pelo agregado, percebe-se que utilizar apenas uma ou outra densidade pode levar a valores incorretos de  $V_v$ , VAM e RBV.

#### 2.11.2.1 Volume de vazios ( $V_v$ )

O volume de vazios ( $V_v$ ) só pode ser adequadamente calculado através da densidade efetiva do agregado, pois somente dessa forma pode-se considerar que parte da quantidade do asfalto adicionado à mistura é absorvido pelo agregado e, portanto, apenas a quantidade não absorvida (efetiva) do asfalto pode preencher os vazios entre as partículas dos agregados (GOUVEIA, 2006).

Ao se empregar a densidade aparente no cálculo do  $V_v$ , considera-se que toda a quantidade de asfalto adicionada à mistura está preenchendo os vazios entre os agregados, ou seja, que nenhuma quantidade de asfalto é absorvida, fato que explica o menor valor de  $V_v$  em relação aos outros (GOUVEIA, 2006).

Por outro lado, ao se empregar a densidade real no cálculo do  $V_v$ , considera-se que os poros permeáveis à água e ao asfalto fazem parte do  $V_v$  das misturas, embora somente os vazios entre as partículas de agregado cobertas por asfalto deveriam ser considerados (GOUVEIA, 2006).

Paranavithana e Mohajerani (2006) verificou que o volume de vazios diminui com o aumento do teor de ligante asfáltico. Isto ocorre devido ao fato de que o ligante asfáltico inicialmente tende a preencher os vazios. Os autores concluíram ainda que a quantidade de vazios de ar encontrados quando da substituição por frações de agregado miúdo é maior quando comparadas com as frações de agregado graúdo. Esse fator é justificado devido à maior superfície específica dos agregados miúdos, que exige mais asfalto para preencher os poros e, conseqüentemente, uma maior quantidade de asfalto é necessária para preencher os vazios nas amostras de agregado miúdo em comparação com os feitos dos agregados graúdos.

Segundo AI (1998) *apud* Marinho (2011), o volume de vazios 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, Vv elevados, acima de 8% comprometem a durabilidade do pavimento. Misturas com Vv entre 6% e 13% não são consideradas nem impermeáveis nem drenantes, tornando-se mais suscetíveis 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 (Vv) e relação betume/vazios (RBV).

#### 2.11.2.2 Vazios de agregados minerais (VAM)

O VAM só pode ser calculado corretamente quando utilizada a densidade aparente do agregado, pois dessa forma, assegura-se que o volume do agregado considerado corresponde à soma dos volumes dos poros permeáveis à água e ao asfalto, ou seja, nenhuma porosidade da partícula é tomada como parte do volume de vazios entre as partículas do agregado. Ao ser empregada a densidade efetiva do agregado, considera-se que o VAM corresponde à soma dos vazios entre as partículas do agregado mais o volume dos poros do agregado permeáveis ao asfalto. A inclusão errônea dos espaços porosos do agregado permeáveis ao asfalto como parte do VAM sugere um valor mais elevado em comparação com o VAM corretamente calculado (GOUVEIA,2006).

Se o VAM é pequeno, o ligante asfáltico necessário ao adequado recobrimento das partículas preencherá todos os vazios, ou então a mistura apresentará baixo vazios de ar (Vv) e a película será de espessura insuficiente acarretando problemas de durabilidade. Segundo Ceratti *et al.* (2011) ambas as situações são indesejáveis. Quanto menor o VAM indica que houve na mistura uma redução da quantidade de ligante gerando baixa flexibilidade ao revestimento com tendência ao trincamento e a desagregações precoces.

Segundo Kandhal *et al.* (1998), o VAM obtido para misturas densas dosadas pelo método Marshall é o mínimo requisitado pelo Superpave. A especificação de VAM mínimo visa garantir a durabilidade da mistura, através de uma quantidade mínima de asfalto na mesma. No entanto, a durabilidade de

misturas asfálticas está estreitamente ligada à espessura da película de ligante asfáltico que recobre o agregado. Sendo assim, o VAM mínimo deveria ser baseado na espessura de película de asfalto que recobre os agregados, pois a espessura varia de acordo com a graduação da mistura.

### 2.11.2.3 Relação betume/vazios (RBV)

Relação betume/vazios (RBV), é definido como sendo a porcentagem de VAM que contém asfalto.

O RBV afeta a durabilidade e a flexibilidade do revestimento asfáltico e, portanto, as misturas asfálticas devem se enquadrar numa faixa de RBV para a garantia de uma quantidade suficiente de asfalto que assegure uma adequada película de asfalto recobrindo as partículas de agregado, de forma a evitar o envelhecimento e endurecimento, mas sem excesso, pois ligante em excesso também é prejudicial à mistura, além de aumentar o custo. Geralmente o valor ótimo de RBV é atingido quando a mistura se enquadra nos valores de VAM especificados em função do diâmetro máximo nominal.

Cominsky *et al.* (1998) *apud* Gouveia (2006) apresentam valores referência como 75% e comentam que misturas com RBV menor que 65% podem levar ao endurecimento prematuro ou excessivo de misturas asfálticas projetadas para rodovias com volume de tráfego médio a alto, causando trincas por fadiga e desgaste do revestimento asfáltico. Já misturas com RBV maior que 85% são propensas à exsudação, corrugação e deformação permanente.

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*).

Como a relação betume-vazios é função do VAM e do teor de asfalto efetivo na mistura não há como se obter valores corretos de VAM e Vv com base em uma única densidade. Na pesquisa de Gouveia (2006) é demonstrado que, para a obtenção de valores realísticos de VAM, Vv e RBV, deve-se ter sempre em mente alguns conceitos básicos:

- em uma mistura compactada, somente os espaços entre as partículas de agregados cobertas pela película de asfalto podem ser considerados como

volume de vazios;

- a porosidade da partícula de agregado não deve ser incluída como volume de vazios;
- a quantidade de asfalto absorvido não deve ser considerada como parte integrante da película de asfalto.

### 2.11.3 Teor de ligante

Paranavithana e Mohajerani (2006) concluíram que o teor ótimo de asfalto é maior para as amostras feitas com os agregados miúdos reciclados em comparação com aqueles feitos com agregados graúdos reciclados.

Paranavithana e Mohajerani (2006) estudaram a massa específica de todas as amostras ensaiadas com teores de 5,5 e 6% de ligante asfáltico, cujos valores obtidos foram muito semelhantes. Isto é esperado, pois o asfalto em uma mistura age como um lubrificante, permitindo que os agregados possam ser bem compactados até atingirem um ponto ideal. Além de alcançar a densidade máxima, quando o ligante asfáltico é adicionado ele cria uma película espessa que faz a separação dos agregados, resultando assim em diminuição da densidade. Portanto, conclui-se que massa específica das amostras com a adição de agregados reciclados porosos foi reduzida e a redução foi ainda maior quando substituídos agregados naturais por agregados miúdos, em comparação com a substituição por agregados graúdos, quando em um percentual igual de adição para cada caso.

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.

Segundo Bernucci *et al.* (2007) os critérios convencionais volumétricos não garantem que o teor de projeto dito ótimo, corresponda necessariamente ao melhor

teor para todos os aspectos do comportamento da mistura asfáltica. Com a disseminação dos métodos mecânicos de dimensionamento, recomenda-se que numa dosagem racional a mistura seja projetada para um determinado nível de resistência a tração (RT) e módulo de resiliência (MR), de maneira que os conjuntos de tensões nas camadas que compõe a estrutura do pavimento não venham diminuir a vida útil do pavimento.

Segundo Ceratti *et al.* (2011) o método de dosagem Marshall pode apresentar diversas alternativas para a escolha do teor de projeto de ligante asfáltico. Segundo a *National Asphalt Pavement Association- NAPA* (1982), a escolha do teor do ligante primordialmente para camadas de rolamento em concreto asfáltico é baseada somente no volume de vazios (Vv), correspondente a 4%, ou o Vv correspondente a média das especificações. No Brasil a escolha do teor de projeto correspondente a Vv de 4% também é adotada por alguns órgãos rodoviários. Observa-se distinção de procedimentos para definir o teor de projeto dependendo do órgão, empresa ou instituto de pesquisa. É comum a escolha se dar a partir da estabilidade Marshall, da massa específica aparente e do Vv. Nesse caso, o teor de projeto é a média de três teores correspondentes aos teores associados à máxima estabilidade, à massa específica aparente máxima da amostra compactada e a um Vv de 4% (ou média das especificações).

#### 2.11.4 Deformação Permanente

Mills-Beale e You (2010) verificou que, com o aumento de teor de ARC nas misturas, há um aumento correspondente na deformação. Porém, nos teores de ARC de 25%, 35%, 50% e 75%, verificou-se que a especificação máxima do limite para a deformação permanente, que é de 8 mm, é satisfeita. A mistura de controle (com 0% de agregado reciclado de concreto) teve deformação de 1,14 mm após 8000 ciclos de carga. Além disso, entre 25% e 35% de agregado reciclado de concreto no CBUQ, há um aumento de deformação permanente igual 8,1%. Esse percentual da deformação aumenta para 37,85%, quando a substituição por agregado reciclado é de 35% para 50% e, é igual a 76%, quando o ARC aumenta de 50% para 75%.

Conforme a hipótese, à medida que aumenta o percentual de agregado reciclado de concreto ao CBUQ, o módulo dinâmico ou de rigidez da mistura diminui. Embora não existam limites mínimos para os resultados de módulo dinâmico, novas pesquisas estão sendo feitas para utilizar os resultados introduzidos no Guia de Projetos de Pavimentos (MEPDG) recentemente para verificar a resistência das misturas para asfalto em baixa temperatura e trinca por fadiga. O ARC é capaz de servir como um substituto útil em estradas de CBUQ onde cargas de tráfego são pequenas. Os resultados mostram que é pouco provável que a deformação permanente na estrada seja um problema sob condição de tráfego baixo, utilizando até 75% de agregado reciclado de concreto. Acredita-se que uma substituição maior que 75% de agregado natural por agregado reciclado de concreto levará à falhas no critério de especificação (MILLS-BEALE e YOU, 2010).

De acordo com Pérez *et al.* (2011), - CBUQ projetado com ARC graúdo atende os parâmetros Marshall para estradas de baixo volume e apresentam uma boa resistência à deformação permanente.

#### 2.11.5 Módulo de Resiliência (MR)

No trabalho realizado por Souza e Soares (2003), os autores mencionam a importância de se considerar as misturas asfálticas como materiais viscoelásticos e não elásticos. No caso de materiais elásticos, é comum considerar-se os valores do módulo de Young, do módulo de resiliência e do módulo dinâmico numericamente iguais. Porém, para materiais visco-elásticos, até mesmo o módulo de resiliência e o módulo dinâmico diferem entre si.

A determinação do MR para misturas asfálticas pode ser feita, basicamente, através dos ensaios de compressão diametral e compressão uniaxial (YODER e WITCZAK, 1975; HUANG, 1993). Nos EUA o ensaio de MR realizado por compressão diametral vem sendo reavaliado, a fim de serem propostas algumas modificações ao método da ASTM adotado (ASTM D 4123-82), porém no Brasil o procedimento ainda vem sendo largamente utilizado através do método de ensaio DNER ME 133/94, principalmente nas universidades.

Na pesquisa elaborada por Mills-Beale e You (2010), a temperatura de ensaio influenciou o módulo de resiliência da mistura mais que o efeito das

diferentes quantidades de agregado reciclado de concreto na mistura. O módulo resiliente aumentou com a diminuição do percentual de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto para as três temperaturas: 5, 25 e 40 °C. À temperatura mínima de teste de 5° C, o módulo resiliente é o mais alto dentre os estudados, indicando que a condição mais dura do material ainda está sob o comportamento de deformação recuperável. De acordo com a AASHTO, quanto maior o módulo de resiliência melhor é quando se visa construir um pavimento menos espesso, porém mantendo a integridade estrutural.

Paranavithana e Mohajerani (2006) concluíram que o módulo de resiliência da mistura diminui, conforme se aumenta o teor de ligante asfáltico.

#### 2.11.6 Resistência à Tração (RT)

Mills-Beale e You (2010) afirma que, para o uso de agregado reciclado de concreto (ARC) em um asfalto do tipo CBUQ, deve ser estipulado um limite máximo de especificação necessário para garantir que as propriedades de resistência à tração da mistura sejam preservadas sob os efeitos do gelo, neve e outras formas de precipitação.

Su *et al.* (2009) verificaram que, comparado com o CBUQ de controle, a resistência à tração das misturas recicladas era sempre maior e a diferença reduzia ainda mais conforme aumentava a temperatura.

#### 2.11.7 Absorção de água e absorção de asfalto

A taxa de absorção de asfalto pelo agregado é calculada através das densidades efetiva e aparente do agregado, assim como da densidade do asfalto. Conceitualmente, a taxa de absorção de asfalto é uma relação entre a massa do asfalto absorvido pela massa do agregado na mistura.

Bernucci *et.al.* (2007) cita que dois parâmetros muito importantes na mistura são os vazios de ar ( $V_v$ ) e o volume de vazios de agregados minerais (VAM), que representa o que não é agregado na mistura, ou seja, vazios com ar e asfalto efetivo (descontando o asfalto que foi absorvido pelo agregado). Os vazios cheios com betume (VCB), diz respeito ao asfalto disponível para a mistura com o asfalto absorvido.

O cálculo acurado desses volumes é influenciado pela absorção parcial do asfalto pelo agregado. Se o asfalto não é absorvido pelo agregado, o cálculo é relativamente direto e a massa específica aparente ( $G_{sb}$ ) do agregado pode ser usada para calcular o volume do agregado. Se a absorção do asfalto é idêntica a absorção de água como definido pela ASTM C 127 ou C128, o cálculo é relativamente direto e a massa específica real ( $G_{sa}$ ) pode ser usada para calcular o volume de agregados. Visto que quase todas as misturas têm absorção parcial de asfalto, os cálculos são menos diretos (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Rice (1953) *apud* Gouveia (2004) propôs um método de determinação indireta da absorção de asfalto através da densidade máxima medida das misturas. Uma limitação desse método é a necessidade de cobertura total das partículas do agregado pela película de asfalto, pois, no momento da saturação por vácuo parcial, se as partículas não estiverem completamente envolvidas pelo asfalto, estas passam a absorver água, comprometendo os resultados do ensaio. Entretanto, Rice (1953) propôs também um procedimento suplementar para correção desse problema, caso venha a ocorrer, descrito na norma ASTM D 2041.

Castro Neto (1996) *apud* Gouveia (2006) desenvolveu outro método de determinação indireta da absorção de asfalto, também através da densidade máxima medida, no entanto, empregando querosene, ao invés do vácuo parcial proposto por Rice, para expulsar os vazios de ar das misturas. Esse método é particularmente atraente para utilização em campo por ser rápido, com vantagens sobre o método Rice, que necessita da aplicação de vácuo para a retirada de vazios de ar da mistura, o que torna a sua prática em obras muito delicada, principalmente tendo em vista a precisão necessária. Segundo Vasconcelos *et al.* (2003), os resultados obtidos tanto através do método Rice como através do método do querosene produzem praticamente os mesmos valores de DMM, porém, apesar do método do querosene parecer bastante promissor, necessita ser melhor investigado, pois o querosene é um solvente natural do asfalto.

Atualmente, o Superpave estabelece o uso do Método Rice para a determinação da DMM das misturas, por ser um ensaio de execução relativamente rápida, realístico e apropriado também para a determinação da absorção de asfalto.

O processo de preparo da amostra para a determinação da DMM é o mesmo utilizado na composição dos corpos de prova Marshall, excluindo a etapa de compactação. Esse procedimento consiste em peneirar o material granular nas frações necessárias e, então, compor a mistura de agregados de acordo com a curva granulométrica utilizada. A mistura deve ser produzida com o teor de asfalto de projeto ou então num teor muito próximo dele, caso este ainda não seja conhecido. O agregado poroso irá absorver ligante asfáltico, consumindo parte do ligante necessário para dar coesão à mistura, para compensar este fato, deve-se incorporar a mistura uma quantidade adicional de ligante, fato este que pode inviabilizar a utilização de agregados reciclados de concreto que tenham alta absorção devido ao aumento do custo da mistura. Além disso, agregados com elevada porosidade podem apresentar porosidade variável conforme a amostragem, o que dificulta o estabelecimento correto do teor de ligante (CERATTI, 2011).

Para o cálculo correto das propriedades volumétricas das misturas, deve-se utilizar a densidade aparente do agregado, normalizada pelas normas da ASTM, AASHTO ou DNER, e considerar a quantidade de asfalto absorvido pelos agregados, que pode ser determinada através de vários métodos, dentre eles o utilizado nesta pesquisa, o método Rice (GOUVEIA, 2006).

Outros métodos de determinação correta das propriedades volumétricas das misturas podem, também, ser utilizados, tais como o Diagrama de Componentes, adotado pelo Superpave, ou o método apresentado por McLeod (1956). É importante notar que o uso de uma determinada densidade do agregado pode estabelecer a adequação ou não da mistura projetada às especificações requeridas em um método de dosagem. Porém, ao se calcular as propriedades volumétricas das misturas de maneira correta, ou seja, usando a densidade aparente e efetiva do agregado, verifica-se que a mistura está adequadamente projetada. Portanto, fica bastante claro que uma mistura pode ser aceita ou não dependendo da densidade do agregado empregada e da existência ou não de asfalto absorvido pelos agregados (GOUVEIA, 2006).

A determinação de absorção de água é um bom indicador para avaliar a qualidade dos agregados reciclados para a sua aplicação na produção de CBUQ. Absorção de água e massa específica na condição de superfície saturada seca são

duas propriedades decisivas que definem a qualidade do agregado. A alta absorção de agregados reciclados mistos deve ser levada em consideração na mistura, devido ao fato de que parte do ligante adicionado à mistura vai aderir os poros acessíveis de agregados reciclados (AGRELA, 2011).

A alta taxa de absorção de água do agregado reciclado de concreto é uma propriedade que incentiva o deslocamento do betume pela água, dando origem a perda de adesividade dos agregados e uma perda generalizada de propriedades mecânicas. É a argamassa de cimento aderido ao agregado graúdo, juntamente com algumas impurezas, que conferem essa alta absorção de água no material. É importante realizar uma pesquisa mais extensa para estudar a durabilidade do CBUQ feito com agregado graúdo reciclado (PÉREZ *et al.*, 2011).

Segundo Solyman (2005), a densidade de mistura, bem como o asfalto absorvido, não tem limites para as misturas betuminosas, mas as relações derivadas apresentam as relações diretas entre essas propriedades e a absorção de areias recicladas e eles podem ser usados para calcular o aumento dos custos de ligante adicional.

Solyman (2005) também verificou que usando areias recicladas, a densidade da mistura diminui consideravelmente e aumenta o teor de ligante necessário. Verificou-se que a absorção de água e densidade das areias recicladas pode ser correlacionada às propriedades da mistura com mais precisão, isto porque a densidade descreve o material original da areia e sua porosidade, enquanto a absorção de água é afetada pela porosidade, forma, textura da superfície das partículas, bem como a graduação de areia, onde todos esses parâmetros influenciam as propriedades da mistura.

Gouveia (2004) estudou várias taxas de absorção do ligante e verificou que os resultados confirmam com as duas hipóteses já levantadas durante a observação do comportamento da absorção de curto e de longo prazo: as misturas com um mesmo tipo de agregado e com um mesmo teor de asfalto, mesmo em temperaturas diferentes (viscosidade diferente do asfalto), podem apresentar taxas de absorção de asfalto semelhantes e os agregados absorvem asfalto até alcançarem a saturação de seus poros.

Sugeri também a hipótese de que, misturas submetidas a períodos de cura de 2 horas não apresentam absorções de longo prazo. Isso indicaria que 2 horas de cura seria um tempo adequado para promover a saturação dos poros dos agregados.

Gouveia (2004) ainda chegou a algumas conclusões quanto à absorção de ligante pelos agregados:

- a absorção aumenta ao longo do tempo, mas tende à estabilização;
- na absorção de curto prazo, de longo prazo e também na de longo prazo com 2 horas de cura, o agregado tende a absorver mais asfalto quanto menor a espessura da película de asfalto que o envolve, provavelmente em razão da diminuição da tensão superficial, que permite que o asfalto migre com mais facilidade para o interior dos poros;
- a DMM e, conseqüentemente, a absorção, variam com o teor de ligante adicionado à mistura;
- quanto menor a temperatura do asfalto (maior viscosidade) maior o tempo necessário para a estabilização da absorção ou saturação dos poros do agregado;
- os valores de absorção de curto prazo não diferem significativamente dos de longo prazo, indicando que o agregado absorve a quantidade de ligante necessária para atingir a saturação de seus poros, independentemente de quanto tempo leve para isso;
- os valores da absorção de asfalto em função do tempo podem ser ajustados através de uma curva hiperbólica, apresentando elevado coeficiente de correlação entre a absorção ensaiada e a absorção estimada;
- é possível prever a variação da DMM de uma mistura asfáltica com base na absorção, em função do tempo;
- a taxa de absorção de asfalto pelo agregado é dependente do tempo, da temperatura (viscosidade do asfalto) e do teor de asfalto da mistura, assim

- como das características dependentes do agregado;
- mesmo estando em situações de diferentes temperaturas (viscosidade do asfalto), as misturas com um mesmo tipo de agregado e mesmo teor de asfalto tendem a absorver quantidades semelhantes de asfalto, ainda que transcorridos períodos de tempo diferentes;
  - os poros das partículas dos agregados absorvem asfalto até alcançarem sua saturação. A saturação pode ser alcançada mais facilmente, num menor tempo, quando a temperatura do asfalto está mais alta (viscosidade mais baixa), ou em um período mais prolongado, com o passar dos meses, quando o asfalto está na temperatura ambiente, numa viscosidade mais elevada;
  - ao submeter as misturas a períodos de cura de 2 horas pode-se evitar absorções de longo prazo.

Segundo Gouveia (2004), a absorção é um fenômeno complexo, que envolve vários fatores e influencia as propriedades volumétricas das misturas e pode ser a responsável pelo aparecimento de vários defeitos no pavimento, caso seja negligenciada. A absorção não é um fenômeno que ocorre eventualmente, pelo contrário, a maioria dos agregados possui algum grau de absorção. Portanto, durante o desenvolvimento de projetos de misturas asfálticas, deve-se, sempre, considerar a possibilidade de absorção de asfalto pelos agregados, para que não ocorram erros de cálculo de parâmetros volumétricos, utilizados como critério de projeto.

Segundo Ceratti *et al.* (2011), recomenda-se que não se utilize a DMT quando a absorção do agregado for maior que 0,5%. Esta deve ser substituída pela utilização da DMM, determinada no ensaio denominado massa específica máxima medida, conhecido como RICE e descrito na ABNT NBR 15619/12.

#### 2.11.8 Temperatura

O controle e otimização da temperatura de mistura ocasionam boas propriedades reológicas aos ligantes asfálticos. Com o projeto ideal, a temperatura final da mistura atenderia plenamente os requisitos de temperatura ótima de mistura

e compactação com o menor consumo de energia. As temperaturas ótimas de mistura e compactação podem ser determinadas pela curva de viscosidade à temperatura, que aumentam conforme a concentração de ligante e de agregado reciclado (WU *et al.*, 2007).

#### 2.11.9 Durabilidade

Os CBUQ projetados com agregados graúdos reciclados apresentam comportamento de baixa adesividade que tem um efeito negativo sobre a durabilidade das misturas. Se este problema for resolvido, eles estariam aptos para utilização em pavimentos de estradas de baixo volume. A utilização de agentes que melhorem a adesividade em betume e pré-tratamentos de agregados reciclados deve ser incluída nas investigações suplementares para melhorar a durabilidade das misturas feitas com agregados graúdos reciclados (PÉREZ *et al.*, 2011).

Solyman (2005) verificou como forma de avaliar a durabilidade e a resistência à ação da água, que os valores de estabilidade após imersão em água a 60° C por 48 horas mostraram perda de estabilidade de 6% para 11% quando se compara uma mistura utilizando 5% de areia reciclada com a areia de referência.

### 2.12 A INFLUÊNCIA DO AGREGADO MIÚDO NAS MISTURAS BETUMINOSAS

Poucas pesquisas estudaram a influência do agregado nas misturas asfálticas, porém muitos pesquisadores, inclusive do grupo SHRP, foram obrigados a produzir especificações para os agregados para utilização em asfalto. Dentre as propriedades mais importantes dos agregados identificadas pelos pesquisadores do programa SHRP destaca-se a angularidade do agregado fino. Muitos destes pesquisadores têm afirmado que as características da fração fina do agregado têm predominante influência na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. A influência da angularidade e textura do agregado fino nas estabilidades Marshall e Hveem é consideravelmente maior que a influência da angularidade e textura do agregado graúdo para misturas contendo mais que 50% de finos.

Solyman (2005) estudou a caracterização de seis areias de materiais reciclados diferentes e a classificação delas de acordo com sua influência sobre propriedades do concreto e de misturas betuminosas. Verifica-se que não se sabe

em que medida a forma da partícula e textura da superfície de areia afetam o comportamento do concreto produzido com ele, mas que essas duas propriedades tem um efeito visível na mistura do asfalto.

Na pesquisa de Solyman (2005) verificou-se que as areias recicladas podem ser usadas em base de pavimentos e em revestimento asfáltico no teor de até 21% da massa total agregado. O principal aspecto da influência das areias recicladas em propriedades da mistura betuminosa foi que todas as areias recicladas diminuíram os vazios dos agregados minerais (VAM), que pode não oferecer espaço suficiente para a eficácia do betume e os vazios de ar necessários na mistura.

Os agregados reciclados em geral, têm a superfície mais áspera em comparação aos agregados naturais, enquanto a forma das partículas depende dos métodos de reciclagem. Há uma falta de dados disponíveis sobre a diferença quantitativa entre areia natural e areia reciclada em relação à textura e na forma de partículas (SOLYMAN, 2005).

Segundo Solyman (2005), a densidade de mistura, bem como o asfalto absorvido, não tem limites para as misturas betuminosas, mas obtiveram-se relações diretas entre essas propriedades e a absorção de água de areias recicladas. Verificou-se que a absorção de água e densidade das areias recicladas pode ser correlacionada às propriedades da mistura com mais precisão. Isto porque a densidade descreve o material original da areia e sua porosidade, enquanto a absorção de água é afetada pela porosidade, forma, textura da superfície das partículas, bem como a graduação da areia, onde todos esses parâmetros influenciam as propriedades da mistura.

Solyman (2005) concluiu em sua pesquisa que:

- o uso de diferentes areias recicladas nas misturas de asfalto quente até 21% do total na massa de agregados é possível em ambas aplicações, de base e ligante;
- a areia reciclada diminuiu a densidade de mistura em valores consideráveis e aumentou o teor de ligante necessário para atingir o valor máximo;
- todas as areias recicladas diminuíram os vazios dos agregados minerais, que

pode não oferecer um suficiente espaço para o asfalto e os vazios de ar necessários na mistura;

- devido à redução dos valores de VAM e aumento do volume de agregado na mistura, aumenta-se a estabilidade e os valores de viscosidade diminuem, ao mesmo tempo que aumenta a rigidez da mistura significativamente;
- os valores do teor de ligante aumentam à medida que aumenta absorção de água da areias recicladas.

Solyman (2005) sugere em sua pesquisa que, produzindo areias recicladas com menor angularidade e textura mais lisa, pode-se reduzir efeito negativo das areias recicladas em propriedades da mistura, necessitando-se de mais atenção e desenvolvimento na tecnologia de processamento. A influência de asfalto efetivo nas misturas betuminosas sobre a durabilidade e a flexibilidade de misturas betuminosas precisa de mais investigação. E o valor mínimo de teor de ligante deve ser aumentado. O efeito do aumento da estabilidade Marshall das misturas betuminosas na durabilidade e na flexibilidade devem ser investigadas quando forem usadas areias recicladas.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 DELIMITAÇÃO

Foram estudadas as propriedades físico-mecânicas dos CBUQ produzidos com agregado miúdo reciclado de concreto (ARCM) em substituição ao pó de pedra. Os materiais constituintes do concreto são provenientes da região metropolitana de Curitiba. O agregado graúdo não foi substituído, sendo 100% natural de origem calcária.

#### 3.2 VARIÁVEIS

- CBUQ produzidos com 3 diferentes teores de substituição do agregado natural pelo agregado miúdo reciclado de concreto (ARCM): 0%, 50%, e 100%;
- CBUQ produzidos com ARCM originados de concretos com resistências: 20 e 40 MPa.

#### 3.3 INTERAÇÕES

- Teor de ARCM x Propriedades físicas e mecânicas e volumétricas das misturas asfálticas [Resistência à tração, Fluência, Estabilidade, Volume de vazios (Vv), Relação Betume Vazios (RBV), Módulo de Resiliência (MR), Resistência à tração por compressão diametral (RT), Determinação do dano por umidade induzida (DUI) e Deformação Permanente];
- Propriedades físicas dos agregados (absorção de água, absorção de asfalto e massa específica) x Propriedades físicas e mecânicas das misturas asfálticas.

#### 3.4 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS

O protocolo de dados é o encadeamento lógico e temporal das etapas para execução de um projeto segundo a estratégia metodológica adotada:

- coleta e caracterização dos materiais: Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), Agregados reciclados, Agregados naturais;
- dosagem de traços experimentais através de dosagem Marshall e análise das propriedades volumétricas e mecânicas (estabilidade e fluência);
- escolha dos cinco traços de projeto das misturas estudadas;
- realização de ensaios mecânicos nas cinco misturas CBUQ: Módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica (MR), Resistência à tração estática por compressão diametral (RT), Dano por umidade induzida (DUI) e Deformação Permanente.

### 3.5 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E DO LIGANTE ASFÁLTICO

#### 3.5.1 Obtenção e caracterização dos agregados naturais e de ARCM

Os agregados graúdos naturais são de origem calcária, provenientes de uma única pedreira localizada na região metropolitana de Curitiba-PR. O agregado miúdo natural utilizado é o pó de pedra fornecido pela empresa Engefoto.

O agregado reciclado de concreto miúdo (ARCM) foi obtido britando-se corpos de prova de concretos de diferentes classes de resistências (20 e 40 MPa) fornecidos pela Usina de Concreto Supermix, localizada em Curitiba, em um britador tipo mandíbula modelo 5030 no LACTEC-UFPR, como ilustra a (Figura 3). Após a britagem, os ARC foram levados à estufa por 24 horas, a temperatura de 110 °C, e então peneirado em diferentes frações: brita, pedrisco e agregado miúdo.

Estas frações de agregado foram misturadas de forma que a curva granulométrica final se adequasse dentro da faixa “C” do DNIT.



FIGURA 3: BRITADOR TIPO MANDÍBULA.

A fração miúda dos agregados foi composta variando-se os teores de areia reciclada na composição, para cada classe de resistência, nos seguintes teores: 0% (referência), 50% e 100%. Assim, foram compostos cinco traços de agregados, sendo que todos seguiram a curva C do DNIT. A forma de denominação dos agregados e traços utilizados nesta pesquisa está descritos na (Tabela 16).

TABELA 16: DENOMINAÇÃO DOS AGREGADOS E TRAÇOS UTILIZADOS NA PESQUISA.

Denominação	Significado
AN	Traço referência, com 0% de agregado reciclado.
AxxMyy	Agregado miúdo reciclado de concreto, sendo que os dois primeiros números (xx) indicam a classe de resistência do concreto e os 2 últimos (yy) o teor de agregado miúdo reciclado
<b>Exemplos</b>	
A20M50	Traço com amostra de concreto de 20 MPa e 50% de ARcm
A40M100	Traço com amostra de concreto de 40 MPa e 100% de ARcm

A caracterização dos agregados reciclados e naturais foi realizada no LAMP (Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira, UFPR). Os ensaios realizados estão descritos na (Tabela 17).

Os ensaios realizados nos agregados objetivaram verificar as propriedades físicas 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 desagregação e deformação

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

TABELA 17: 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	NBR NM 53/2003
Teor de finos < 75 µm	NBR NM 46/2003 DNER-ME 084/95
Absorção e Densidade do agregado Miúdo	NBR NM 52/2009 NBR NM 30/2011
Massa unitária e volume de vazios	NBR NM 45
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98 NBR-NM 51/2001

A (Figura 4) mostra as curvas granulométricas de todos os agregados utilizados nas misturas.

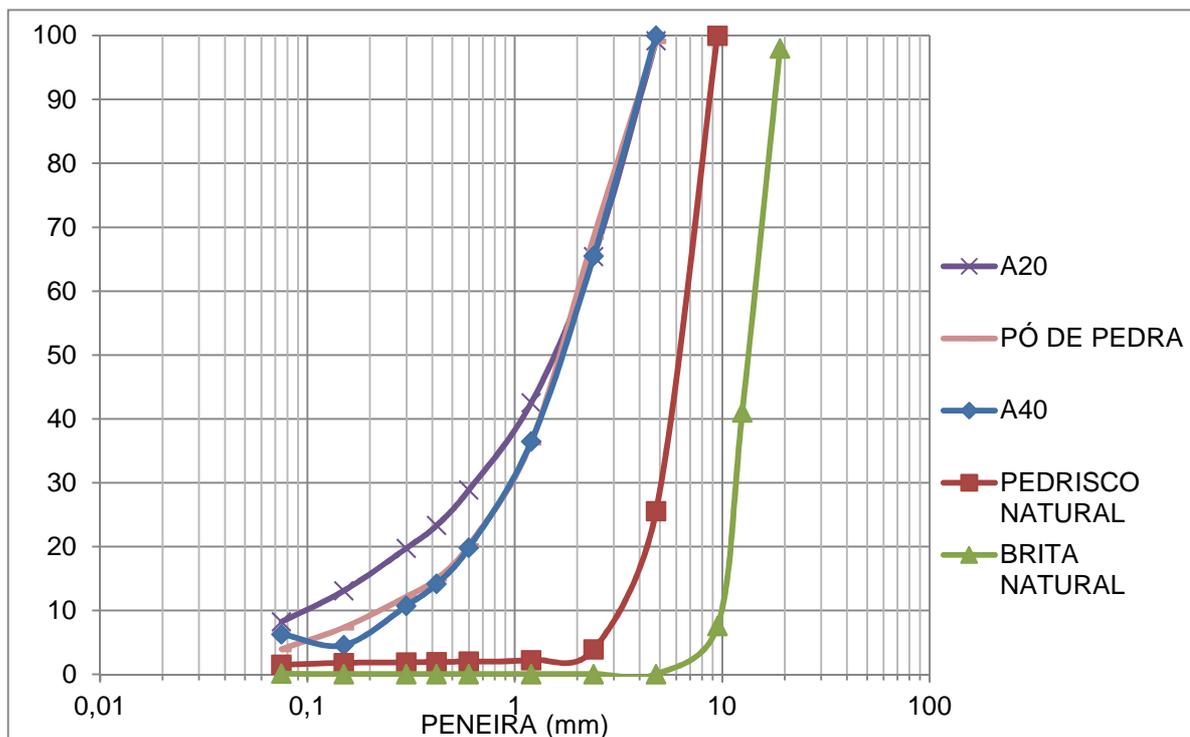


FIGURA 4: CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS.

A (Tabela 18) apresenta os resultados do ensaio de granulometria de cada agregado utilizado na pesquisa.

TABELA 18: GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS - % PASSANTE.

Abertura (mm)	Peneiras	Agregado graúdo (%)	Pedrisco (%)	Pó de pedra (%)	A20 (%)	A40 (%)
19	3/4"	98	100	100	100	100
12,5	1/2"	41	100	100	100	100
9,5	3/8"	8	100	100	100	100
4,8	Nº 4	0	26	99	99	100
2,4	Nº 10	0	4	68	65	66
1,2	Nº 16	0	2	36	43	36
0,6	Nº 30	0	2	20	29	20
0,42	Nº 40	0	2	15	23	14
0,3	Nº 50	0	2	12	20	11
0,15	Nº 100	0	2	7	13	5
0,075	Nº 200	0	1,5	4	8	6

A (Tabela 19) apresenta resultados de caracterização dos agregados graúdos. Na (Tabela 20) estão os resultados de caracterização dos agregados miúdos.

TABELA 19: RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS.

Agregado graúdo	Gsb Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Gsa Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	Massa aparente saturada superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Abrasão Los Angeles (%)
Brita 1	2,72	2,76	2,74	0,5	16%
Brita 0	2,63	2,68	2,65	0,8	

TABELA 20: MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE FINOS &lt; 75 µm DOS AGREGADOS MIÚDOS.

	Gsa Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	Gsb Massa Específica Aparente (g/m <sup>3</sup> )	Teor de finos < 75 µm (%)	Absorção de água (%)
A20	2,26	2,01	8,3	10,70
A40	2,55	2,10	6,3	9,10
AN - Pó de pedra	2,72	2,64	4,0	1,10

### 3.5.2 Obtenção e caracterização do CAP

O cimento asfáltico CAP 50/70 foi obtido junto à empresa Megapav Construtora de Obras, oriundo da REPAR - Refinaria Presidente Getúlio Vargas da Petrobrás, localizada no município de Araucária-PR. Suas propriedades convencionais de acordo com todas as especificações da ANP estão apresentadas na (Tabela 21).

TABELA 21: RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CAP 50/70.

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	ASTM D5	50 a 70	63	0,1 mm
Ponte de Amolecimento	ASTM D36	46 mín.	46,7	°C
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	ASTM D 2161	141 mín.	216	s
Viscosidade Brookfield a 135°C-SP21 20RPM	ASTM D4402	274 mín.	420	Cp
Viscosidade SSF 150GC	E102	50 mín	105,1	s
Viscosidade Brookfield a 150°C-SP21	ASTM D4402	112 mín.	200	Cp
Viscosidade Saybolt furol a 177 GC	E102	30 a 150	38,9	s
Viscosidade Brookfield a 177°C-SP21	ASTM D4402	57 a 285	72	Cp
RTFOT Penetração Retida	ASTM D5	55 mín.	60	%
RTFOT Aumento do Ponto de Amolecimento	ASTM D36	8 máx.	6,1	°C
RTFOT Ductilidade a 25°C	ASTM D113	20 mín.	>100	Cm
RTFOT Variação em % Massa	ASTM D2872	0,5 máx.	-0,317	%
Ductilidade a 25°C	ASTM D113	60 mín.	>100	Cm
Solubilidade no Tricloroetileno	ASTM D2042	99,5 mín.	99,9	% massa
Ponto de Fulgor	ASTM D92	235 mín.	302	°C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X018	-1,5 a 0,7	-1,5	N/A
Densidade relativa a 20/4 GC	D70	(1)	1,013	N/A
Aquecimento a 177 °C	X215	NESP (2)	NESP	N/A

Nota: (1) Ensaio não faz parte da especificação,  
(2) NESP = Não espuma FONTE: REPAR

### 3.5.3 Análise estatística da massa específica e absorção do agregado miúdo reciclado de concreto

Inicialmente pretendia-se analisar doze misturas, originadas de quatro teores de substituição de agregado miúdo natural por reciclado 0%, 25%, 50% e 100% e três classes de resistência de concreto de origem dos agregados reciclados de concreto, 20, 30 e 40 MPa. Porém, após repetições de ensaio de massa específica real e absorção para o agregado miúdo das três classes, verificou-se que não houve variação significativa nestas propriedades quanto se imaginava variando-se as classes de resistência dos concretos originários.

Para verificar estatisticamente as diferenças de massa específica e de absorção obtidas em laboratório para os ARCM, cujos concretos que lhes deram origem possuíam três resistências : 20, 30 e 40 MPa, correspondendo ao A20, A30 e A40, respectivamente, foi realizada a análise estatística que segue nesse capítulo, composta por Análise de Variância e Comparação Múltipla de Médias. Utilizou-se para tal o modelo estatístico do projeto em blocos aleatorizados e nível de significância de 5%.

- fator principal: resistências dos concretos que deram origem aos ARCM (20,

30 e 40 MPa);

- fator secundário: repetições;
- variável de resposta: massa específica e absorção.
- Conforme as tabelas: (Tabela 22), (Tabela 23), (Tabela 24), (Tabela 25) não foram verificadas diferenças estatísticas para os dados de absorção e massa específica obtida dos agregados reciclados. Por esse motivo, optou-se por utilizar apenas dois dos três agregados reciclados de concreto, para procurar verificar se entre a faixa de resistência 20 MPa e 40 MPa de ARcm haverão ou não diferenças significativas nos demais ensaios das misturas asfálticas.

TABELA 22: MASSA ESPECÍFICA APARENTE AGREGADO MIÚDO.

	REPETIÇÕES					TOTAIS
	1	2	3	4	5	
<b>A20</b>	2,32	2,20	2,58	2,51	2,33	11,93
<b>A30</b>	2,26	2,27	2,37	2,49	2,51	11,90
<b>A40</b>	2,56	2,60	2,62	2,49	2,52	12,78
<b>TOTAIS</b>	7,13	7,07	7,57	7,48	7,35	36,60

TABELA 23: TABELA ANOVA MASSA ESPECÍFICA.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab
Repetições	0,06	2	0,03	2,56	4,46*
Resistências	0,10	4	0,02	2,05	3,84*
Resíduo	0,10	8	0,01		
Total	0,26	14			

\*A variável não é significativa

TABELA 24: REPETIÇÕES ABSORÇÃO AGREGADO MIÚDO.

	REPETIÇÕES					TOTAIS
	1	2	3	4	5	
<b>A20</b>	12,00	11,50	11,30	9,50	9,40	53,70
<b>A30</b>	7,10	7,10	4,50	10,00	9,90	38,60
<b>A40</b>	8,90	9,30	10,90	9,50	7,00	45,60
<b>TOTAIS</b>	28,00	27,90	26,70	29,00	26,30	137,90

TABELA 25: TABELA ANOVA ABSORÇÃO.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab
Repetições	1,57	2	0,78	0,19	4,46*
Resistências	22,84	4	5,71	1,38	3,84*
Resíduo	33,22	8	4,15		
Total	57,63	14			

\*A variável não é significativa

### 3.6 DOSAGEM MARSHALL

Optou-se pelo concreto asfáltico (CA), também chamado de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), por ser o mais utilizado nas rodovias brasileiras. Adotou-se a metodologia de dosagem Marshall por ser a mais difundida e utilizada no Brasil e em todo o mundo, sendo que 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. 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.

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 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 na 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 semi confinada. 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 semi confinada.

As misturas contendo agregados reciclados foram dosadas com cinco teores de ligante (5,0%, 5,5%, 6%, 6,5% e 7%). A mistura de referência variou entre 4% e 6%. O teor “ótimo” de projeto foi determinado através do Vv de 4%. As misturas híbridas tiveram a substituição de 0, 50 e 100% do pó de pedra por ARcm. O cálculo dos traços de CBUQ seguiu as recomendações de controle qualitativo, conforme as especificações contidas na norma DNIT – 031/2006 – ES e ME 043/95.

### 3.6.1 Curvas granulométricas

Com base na curva granulométrica das amostras de agregados, foram calculados os traços para dosagem de todas as misturas. As curvas granulométricas de cada uma das misturas estudadas respeitaram os limites da faixa C do DNIT (2006), cuja dimensão máxima característica é igual a 19 mm (Tabela 26).

TABELA 26: FAIXAS GRANULOMÉTRICAS PARA CBUQ (NORMA DNIT 31/2006 – ES).

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 <sub>2(+)</sub> (%)		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%

E ainda nas frações miúdas foram controladas as granulometrias peneira a peneira com o objetivo de minimizar as variáveis durante as misturas.

Para a preparação das misturas, as amostras de todos os materiais foram previamente lavadas, secadas na estufa, pesadas e preparadas, conforme recomendações das Normas DNIT ME 031/06 e ME 043/95.

As misturas foram enquadradas na faixa C da norma DNIT ES 31/06, com a utilização de CAP 50/70. A composição dos agregados foi ajustada por tentativas e ficou então distribuída em porcentagem do peso total conforme a (Tabela 27). A distribuição granulométrica das misturas é apresentada na (Tabela 28).

TABELA 27: COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS NAS MISTURAS.

Materiais	AN	ARCm (50%)	ARCm (100%)
Brita 1	20%	20%	20%
Brita 0	22%	22%	22%
Pó de pedra	58%	29%	0%
ARCm	0%	29%	58%
Total	100%	100%	100%

TABELA 28: GRANULOMETRIA DAS MISTURAS - % PASSANTE.

Abertura (mm)	Peneiras	(%) passante
19,1	3/4"	100
12,5	1/2"	90
9,5	3/8"	80
4,8	Nº 4	58
2,4	Nº 10	36
1,2	Nº 16	26
0,6	Nº 30	17
0,3	Nº 50	13
0,15	Nº 100	10
0,075	Nº 200	6

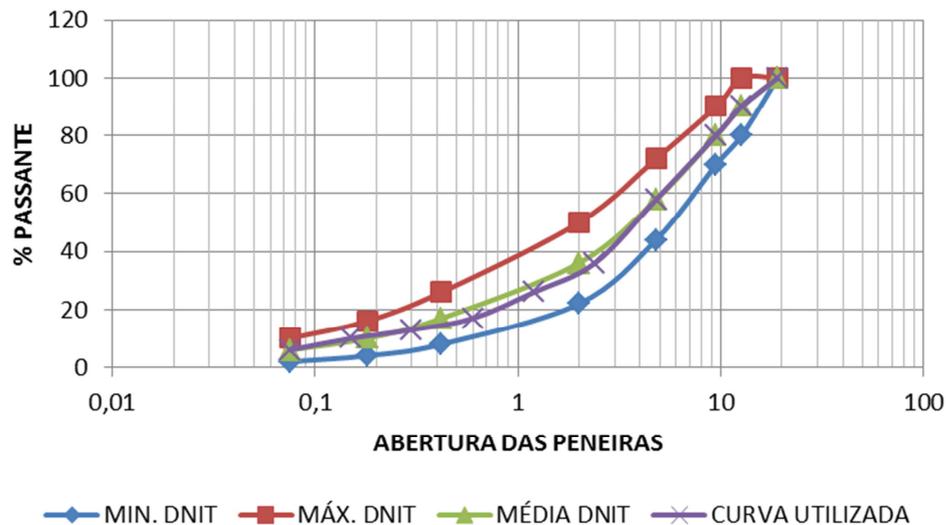


FIGURA 5: GRANULOMETRIA DOS TRAÇOS ENQUADRADOS NA FAIXA C DNIT.

Procurou-se ajustar a composição no centro da faixa C do DNIT. Pode-se observar na (Figura 5) as curvas contínuas dentro dos limites inferiores e superiores da faixa. Para todas as misturas foram controladas as granulometrias peneira a peneira da faixa correspondente ao agregado miúdo.

### 3.6.2 Determinação da massa específica dos agregados

Foi determinada a massa específica real ( $G_{sa}$ ) e a massa específica aparente ( $G_{sb}$ ) dos agregados que compõe as misturas betuminosas, no entanto sabe-se que em misturas asfálticas uma parcela do material betuminoso adicionado a mistura penetra nos poros do agregado não os preenchendo totalmente e que deve ser considerado nos parâmetros volumétricos da mistura compactada.

As massas específicas e a absorção listada na (Tabela 29) foram obtidas segunda ABNT NBR NM53/03 para os agregados graúdos e ABNT NBR NM52/03 para os agregados miúdos.

TABELA 29: MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DOS AGREGADOS.

Agregado Graúdo	Gsb Massa Esp aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Massa sat. sup. seca (g/cm <sup>3</sup> )	Gsa Massa esp. real(g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)
Brita 1	2,72	2,74	2,76	0,5
Brita 0	2,63	2,65	2,68	0,8
Pó de Pedra	2,56	-	2,63	1,1
A20	2,01	-	2,26	10,7
A40	2,10	-	2,55	9,1

A massa específica real inclui os vazios impermeáveis somente, ou seja, não inclui o volume de qualquer poro ou capilar que se encontre preenchido com água após 24 horas em imersão (vazios permeáveis). Por definição, é calculada pela expressão (1), segundo ABNT NBR NM53/03 e ABNT NBR NM52/03:

$$Gsa = \left[ \frac{\text{massa seca}}{(\text{massa seca} - \text{massa imersa})} \right] * 0,9971 \quad (1)$$

E a massa específica aparente é calculada pela expressão (2):

$$Gsb = \left[ \frac{\text{massa seca}}{(\text{massa saturada superfície seca} - \text{massa imersa})} \right] * 0,9971 \quad (2)$$

Nota-se que o valor de Gsb - massa específica aparente (massa que considera os vazios superficiais permeáveis à água e ao asfalto, pois inclui o volume do agregado sólido mais o volume dos poros superficiais contendo água), é menor no ARC do que no agregado natural, porém o A40 que foi produzido a partir de um concreto de classe de resistência maior possui tanto a massa real como a massa aparente maior do que o A20, possivelmente pelo fato de quanto mais alta a classe de resistência do concreto menor a porosidade.

A absorção de água dos agregados é determinada pela expressão (3):

$$a = \left[ \frac{(\text{massa saturada superfície seca} - \text{massa seca})}{\text{massa seca}} \right] * 100 \quad (3)$$

No caso da absorção dos agregados nota-se que o valor de absorção de água é maior nos agregados reciclados de concreto do que nos agregados naturais, e ainda que o agregado A20 possui maior absorção que agregado A40,

provavelmente devido ao concreto de maior resistência característica possuir menos poros.

### 3.6.3 Determinação dos teores de ligantes a serem moldados

Quando não se conhece bem o intervalo de variação dos teores de CAP a utilizar, pode-se tomar como referência o “Teor Teórico” e distribuir o intervalo como indicado: -1,0%; -0,5%; TEOR TEÓRICO; +0,5%; +1,0%.

Os teores adotados para as misturas com agregado reciclado foram 5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5%; 7,0%. Como o agregado natural tende a ter menores absorções e o teor utilizado usualmente fica em torno de 6,0%, optou-se por dosar esta mistura com os teores 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%.

### 3.6.4 Moldagem dos corpos de prova das misturas

Depois de fixar a composição granulométrica da mistura e estabelecer o teor teórico, partiu-se para a moldagem dos corpos de prova. Para cada teor foram moldados uma série de três corpos de prova.

Após o aquecimento ao fogo do ligante (CAP 50/70), entre 153-163 °C (Figura 6), temperatura definida em função do gráfico da Viscosidade Saybolt-Furol (Figura 7), e dos agregados a 163-177 °C em estufa, o processo de mistura dos agregados com o ligante foi realizado manualmente, ao fogo. A temperatura da mistura foi cuidadosamente mantida entre 153 °C e 163 °C, até a total cobertura dos agregados pelo ligante. As viscosidades dos ligantes apresentadas na (Tabela 30) .



FIGURA 6: TEMPERATURA LIGANTE.

TABELA 30: DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE SAYBOLT-FUROL CAP 50/70.

Temperatura (°C)	135	149	177
CAP 50/70 (SSF)	216	105,1	38,9

Estes valores foram plotados em gráficos cartesianos, através do qual foi possível obter os valores das temperaturas de aquecimento e compactação. A curva de viscosidade versus temperatura do ligante apresentada na (Figura 7).

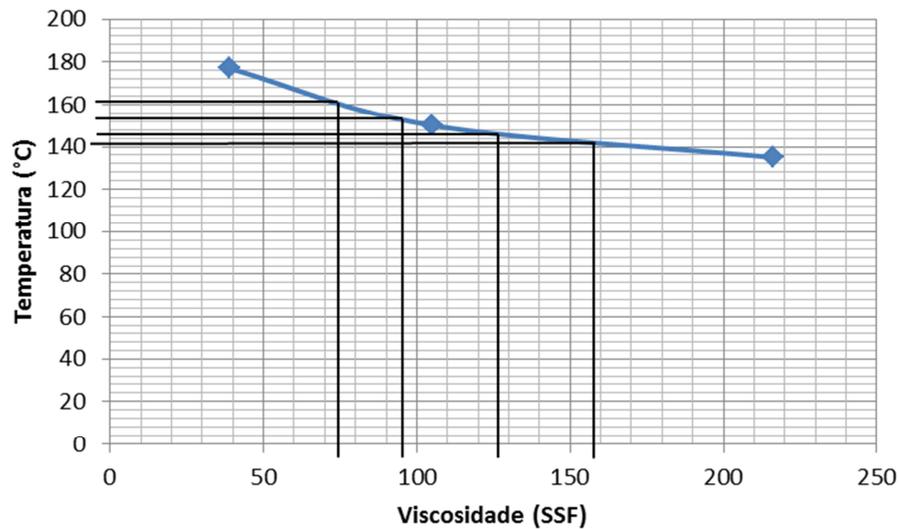


FIGURA 7: CURVA VISCOSIDADE X TEMPERATURA.

Os resultados referentes às temperaturas de compactação iguais são:

- 153 a 163°C para o ligante (CAP 50/70);
- 163 a 177°C para os agregados.

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. Após a moldagem dos corpos de prova de acordo com as temperaturas estabelecidas na Tabela 31, a compactação mecânica foi realizada em um conjunto de base e soquete Marshall entre 140°C e 145°C, com 75 golpes em cada face dos corpos de prova (Figura 8).

TABELA 31: TEMPERATURA DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.

Materiais	Temperatura de aquecimento °C	Temperatura de compactação °C
CAP 50/70	153-163	140-145
Agregados	163-177	



FIGURA 8: COMPACTADOR MARSHALL.

Após a compactação, os mesmos permaneceram nos moldes por, no mínimo, 24 horas até que atingissem a temperatura ambiente.

Após resfriamento, foram desmoldados os corpos de prova (Figura 9), obtendo-se as dimensões do mesmo (diâmetro e altura) para determinação da massa específica seca e da massa específica submersa dos corpos de prova. Com estes valores foi possível obter a massa específica aparente dos corpos de prova ( $G_{mb}$ ) que por comparação com a massa específica máxima medida (DMM) permite obter as relações volumétricas típicas da dosagem, foi realizado o ensaio na prensa Marshall que determina a estabilidade e a fluência.



FIGURA 9: CORPOS DE PROVA.

As grandezas que interferem na dosagem (determinação do teor de projeto), com base nas exigências do método 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;
- Volume: é a diferença entre o peso ao ar e o peso imerso, conforme expressão (4).

$$V = M_s - M_{s_{sub}} \quad (4)$$

Onde:

$M_s$  = Massa seca

$M_{sub}$  = Massa submersa

- Densidade aparente: é o peso ao ar dividido pelo volume, conforme expressão (5).

$$G_{mb} = \frac{M_s}{(M_s - M_{s_{sub}})} \quad (5)$$

- Densidade real (teórica): é a densidade máxima 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. Corresponde à massa específica da mistura sem os vazios, definido pela norma de dosagem de misturas asfálticas ABNT NBR 12891/93. A Equação 6 indica como calcular a DMT:

$$DMT = \frac{100}{\left[ \left( \frac{\%a}{G_a} \right) + \left( \frac{\%Ag}{G_{Ag}} \right) + \left( \frac{\%Am}{G_{Am}} \right) + \dots + \left( \frac{\%f}{G_f} \right) \right]}$$

(6)

Onde:

%a = porcentagem de ligante, expressa em relação à massa total da mistura;

%Ag, %Am, %f = porcentagem do agregado graúdo, miúdo e fíler utilizados na mistura, expressas em relação à massa total da mistura asfáltica;

$G_a$ ,  $G_{ag}$ ,  $G_{am}$ ,  $G_f$  = massas específicas reais (densidades reais) do ligante e de cada um dos agregados graúdo, miúdo e fíler utilizados na mistura.

Para o presente estudo, não foi utilizado o cálculo da DMT através desta fórmula que utiliza as massas específicas reais de cada componente da mistura, utilizou-se a densidade do corpo de prova medida com aplicação de vácuo (RICE Test), segundo os procedimentos da norma ABNT NBR 15619/12 utilizando a massa específica máxima medida (DMM). As vantagens de se usar a DMM são:

- não precisar determinar as densidades reais individuais dos agregados;
- descontar os poros preenchidos com ligante e não a absorção total medida com água, que é muito menos viscosa que o ligante.

O ensaio para determinar a massa específica máxima medida (DMM) pelo ensaio RICE é realizado da seguinte maneira:

- realizar a mistura de agregados e ligante nas proporções pré-estabelecidas

em um recipiente metálico de peso conhecido;

- preencher o recipiente com água (25°C) suficiente para cobrir a mistura;
- aplicar, durante 15 minutos, uma pressão residual no manômetro de 30 mm de mercúrio no recipiente contendo a mistura para expulsar os vazios existentes entre os filmes de ligante;
- restabelecer, no recipiente, a pressão ambiente;
- colocar o conjunto, recipiente + mistura + água, imerso em água durante 10 minutos;
- Pesar o conjunto, recipiente + mistura + água, imerso em água.  
A DMM, para este caso, é obtida pela expressão (7):

$$\text{DMM} = \left[ \frac{\text{B}}{(\text{A} + \text{B} - \text{C})} \right] * \text{Peso específico da água}$$

(7)

Onde:

A: massa da mistura seca ao ar (g);

B: massa do recipiente metálico imerso em água (g);

C: massa do recipiente + mistura, imersos em água (g).

A Figura 10 apresenta uma visão geral do equipamento bem como do medidor de pressão, utilizados neste estudo.



FIGURA 10: EQUIPAMENTO RICE TEST.

Logo,  $V_v$  (8) é a relação entre a densidade real subtraída da densidade aparente, dividida pela densidade real e multiplicada por cem. De acordo com a norma (DNIT 031/06 - ES), o  $V_v\%$  deve variar entre 3% e 5% para camada de rolamento e entre 4% e 6% para camada de ligação (*binder*).

$$V_v = \left[ \frac{(\text{densidade real} - \text{densidade aparente})}{\text{densidade real}} \right] * 100$$

(8)

Os vazios cheios de betume (VCB) (9): é a multiplicação da densidade aparente pelo percentual de betume, dividida pela densidade do ligante.

$$VCB = \frac{(\text{densidade aparente} * \% \text{teor de betume})}{\text{densidade do ligante}} * 100$$

(9)

De acordo com a norma (DNIT 031/06 - ES), é função do tamanho nominal máximo do agregado utilizado (10).

$$VAM = V_v + VCB$$

(10)

A relação betume/vazios (RBV), demonstrado na equação (11), é definido como sendo a porcentagem de VAM que contém asfalto.

$$RBV = \left( \frac{VAM - V_v}{VAM} \right) * 100$$

(11)

A estabilidade é obtida no momento do rompimento do corpo de prova. A 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.

A fluência (1/100) é obtida no medidor de fluência, em mm. Para a realização do ensaio de estabilidade e fluência, foi feita a leitura no defletômetro e anotada no momento da realização do ensaio.

Para a realização do ensaio de estabilidade e fluência, os corpos de prova foram colocados em banho-maria a 60°C, por 30 minutos. Ao retirar os corpos de prova do banho-maria (Figura 11), o ensaio foi executado na Prensa Marshall (Figura 12) em no máximo 30 segundos.



FIGURA 11: BANHO-MARIA CORPOS DE PROVA



FIGURA 12: PRENSA MARSHALL.

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 que estão apresentadas: [( Figura 18: Volume de Vazios x Teor de Ligante. (FIGURA 19: Relação Betume / Vazios x Teor de Ligante.(FIGURA 20: Vazios do Agregado Mineral (VAM) x Teor de Ligante.),(FIGURA 21: Massa Específica Aparente (Gmb) x Teor de Ligante. (FIGURA 22: Massa Específica Máxima Medida (DMM). x Teor de Ligante)]; estes gráficos que ajudam a definir o teor de projeto. Para este estudo optou-se pela escolha do teor de Vv de 4%, pois segundo a *National Asphalt Pavement Association – NAPA* (1982), a escolha do teor de asfalto primordialmente para camadas de rolamento em concreto asfáltico é baseada somente no volume de vazios (Vv), correspondente a 4%, ou Vv correspondente à média das especificações. No Brasil, a escolha do teor de projeto correspondente a um Vv de 4% também é adotada por alguns órgãos rodoviários.

### 3.7 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ABSORÇÃO DE ASFALTO

A taxa de absorção de asfalto pelo agregado é calculada através das densidades efetiva e aparente do agregado, assim como da densidade do asfalto. Conceitualmente, a taxa de absorção de asfalto é uma relação entre a massa do asfalto absorvido pela massa do agregado na mistura.

Sendo conhecida a DMM, é possível determinar a taxa de absorção de asfalto, conforme a expressão (12), através da densidade efetiva dos agregados, onde:

$$\rho_{ef} = \frac{1 - P_b}{\frac{1}{DMM} - \frac{P_b}{\rho_b}} \quad (12)$$

Onde:

$\rho_{ef}$  = densidade efetiva do agregado;

$P_b$  = porcentagem de asfalto na mistura;

$\rho_b$  = densidade do asfalto.

E, sendo conhecidas as densidades efetiva e aparente do agregado e a densidade do asfalto, pode-se calcular a taxa de absorção através da Equação (13).

$$A_{\text{abs}} = 100 * \frac{\rho_{\text{ef}} - \rho_{\text{ap}}}{\rho_{\text{ef}} - \rho_{\text{ap}}} * \rho_{\text{b}} \quad (13)$$

onde:

$A_{\text{abs}}$  = porcentagem de asfalto absorvido por massa de agregado;

$\rho_{\text{ef}}$  = densidade efetiva do agregado;

$\rho_{\text{ap}}$  = densidade aparente do agregado;

$\rho_{\text{b}}$  = densidade do asfalto.

### 3.8 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

As deformações permanentes dos pavimentos são representadas pelo aparecimento dos afundamentos nas trilhas de roda, que são originadas nas camadas subjacentes ao revestimento asfáltico ou causada pela deformação do próprio revestimento.

Segundo DNIT-005/TER (2003), afundamento é a deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada ou não de solevamento, podendo ser de afundamento plástico ou de consolidação (Figura 13).



FIGURA 13: AFUNDAMENTO TRILHA DE RODA (FONTE: DNIT 005/2003-TR).

No estudo foram realizados os ensaios de deformação permanente para todas as misturas. Os ensaios de deformação permanente são geralmente realizados em simuladores de tráfego de laboratório, ou ensaios tipo Creep. Nesse trabalho utilizou-se o simulador de tráfego tipo LCPC (*Laboratoire des Ponts et*

*Chaussés*) do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP.

Devido a grande quantidade, em torno de 10 quilos no caso de placas com até 5 cm de altura, as misturas foram produzidas em misturador mecânico, conforme (FIGURA 14).



FIGURA 14: MISTURADOR MECÂNICO.

Os ensaios foram realizados em placas retangulares moldadas com 50 cm de comprimento, 18 cm de largura e 5 cm de espessura, que foram compactadas por amassamento, através da passagem de pneu, por meio de um equipamento denominado Mesa Compactadora tipo LPC (Figura 15) conforme especificação francesa NF EN 12697-33 (AFNOR,2003) onde a mistura é compactada na mesma temperatura prevista para a compactação em campo.



FIGURA 15: MESA COMPACTADORA.

As placas moldadas na mesa compactadora foram levadas ao simulador de tráfego tipo LP (Figura 16), depois de deixadas a temperatura ambiente. O ensaio foi realizado a 60°C, com aplicação de carga correspondente a um eixo de 100 kN (50kN sobre cada placa), e 30.000 ciclos, conforme especificação francesa NF EN 12697-22 (AFNOR, 2003). A pressão do pneu é de 6 psi (0,41 MPa).



FIGURA 16: SIMULADOR DE TRÁFEGO TIPO LP.

A passagem da roda sobre as placas é feita em ciclos de ida e volta do pneu na frequência de 1Hz. As medidas de afundamento são realizadas em quinze pontos distintos da trilha de roda. O valor final é a média das quinze leituras e o resultado é em porcentagem de afundamento de trilha de roda (Figura 17).



FIGURA 17: PLACAS APÓS ENSAIO NO SIMULADOR.

### 3.9 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de tração indireta por compressão diametral, também conhecido como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido por Lobo Carneiro com a finalidade de determinar a resistência à tração de corpos de prova de concreto de cimento Portland por solicitações estáticas. A extensão do uso para misturas asfálticas se deve possivelmente ao fato dos revestimentos asfálticos, quando sujeitos às solicitações do tráfego, desenvolverem tensões de tração por flexão em suas fibras inferiores (VASCONCELOS, 2004).

O ensaio é realizado em corpos de prova cilíndricos segundo a norma DNIT 136/2010-ME e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicular à carga.

A aparelhagem necessária à execução do ensaio consiste de prensa mecânica com sensibilidade inferior ou igual a 19,6N (ou 2,0kgf), com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de  $0,8 \pm 0,1$ mm/s, estufa capaz de manter a temperatura entre 30 e 60°C, sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura em torno de 25°C, paquímetro.

O procedimento de ensaio pode ser resumido conforme descrito a seguir:

- medir a altura (h) do corpo de prova com paquímetro em quatro posições diametralmente opostas; adotar como altura a média aritmética das quatro leituras;
- medir o diâmetro (d) do corpo de prova com paquímetro, em três posições; adotar como diâmetro a média aritmética das três leituras;
- colocar o corpo de prova na estufa, ou sistema de refrigeração, por um período de duas horas, de modo a se obter a temperatura requerida para o ensaio (25, 30, 45 ou 60°C);
- ajustar os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter o corpo de prova em posição;
- aplicar a carga progressivamente, com velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se dê a ruptura do corpo de prova segundo o plano

diametral vertical; com o valor de carga de ruptura (F) obtido.

A resistência à tração do corpo de prova é calculada segundo a expressão

(14):

$$RT = \frac{2F}{100\pi Dh}$$

(14)

Onde:

RT: resistência à tração, MPa;

F: carga de ruptura, N;

D: diâmetro do corpo de prova, cm;

h: altura do corpo de prova, cm.

para o presente estudo adotou-se a temperatura de ensaio de 25°C e foram ensaiadas as misturas A40M50 E A40 M100.

### 3.10 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Conceitualmente, o módulo de resiliência (MR) vem sendo considerado como o módulo elástico que, juntamente com o coeficiente de Poisson, é o parâmetro que representa o comportamento dos materiais quando usada a teoria da elasticidade. É de conhecimento da comunidade acadêmica, que a maioria dos materiais utilizados na pavimentação não são elásticos, contudo, segundo Huang (1993), se a carga aplicada é pequena quando comparada à resistência do material e é repetida por um número elevado de vezes (geralmente, acima de 200), a deformação sofrida pelo material é quase completamente recuperável e pode ser considerada como elástica. A maior parte da deformação permanente sofrida pela amostra ocorre no estágio inicial de aplicação de carga, e com o aumento do número de repetições essa deformação permanente diminui.

O MR (15) de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ), aplicada repetidamente no plano diametral de uma amostra cilíndrica, e a deformação específica recuperável ( $\varepsilon_t$ ) correspondente à tensão aplicada, a uma determinada temperatura (T):

$$MR = \left( \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \right)_T$$

(15)

O presente trabalho contou com caracterização mecânica das misturas realizada também através do ensaio de MR por compressão diametral. A norma brasileira não distingue MR instantâneo de MR total, como é feito na norma americana (ASTM D 4123-82), porém adotou-se para o presente estudo a determinação do MR instantâneo, que é calculado considerando a deformação recuperável que ocorre instantaneamente durante a fase de descarregamento do ciclo.

Para o presente estudo, o MR foi determinado em CPs moldados em laboratório (diâmetro de  $10 \pm 0,02\text{cm}$  e altura de  $6,35 \pm 0,13\text{cm}$ ) a  $25^\circ\text{C}$ , e o resultado foi obtido através da leitura da deformação instantânea. As tensões empregadas nos ensaios levaram em consideração o valor de tensão do ensaio de RT, com percentual variando entre 15 e 20%, a depender da mistura, devido à sensibilidade dos LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) (0,006mm) do equipamento de compressão diametral do LAMP/UFPR. A norma brasileira limita esse percentual em 30%, enquanto a norma americana recomenda que a deformação vertical total acumulada não ultrapasse 0,025mm. A carga recomendada pela norma americana deve variar de 10 e 50% do valor de RT, a depender da temperatura de ensaio.

Segundo MEDINA (1997), a teoria da elasticidade aplicada à situação de distribuição de tensões e deformações em cilindros carregados diametralmente permite exprimir o módulo de elasticidade em função da força vertical aplicada no CP e do deslocamento horizontal produzido e mensurável, bastando que se conheça o coeficiente de Poisson do material, geralmente assumido 0,3 para misturas asfálticas, e as dimensões do CP, conforme exposto na equação (16):

$$MR = \frac{F}{100 \cdot \delta_r \cdot h} (0,9976\mu + 0,2692)$$

(16)

Onde:

F: carga vertical repetida aplicada diametralmente no CP em N;

 $\delta_r$ : deslocamento elástico ou resiliente para N aplicações de carga em cm;

h: altura do CP em cm;

$\mu$ : coeficiente de Poisson;

A aparelhagem necessária à execução do ensaio consiste de sistema pneumático de carregamento, sistema de medição de deformação da amostra e estrutura de suporte com acessórios.

O procedimento de ensaio pode ser resumido conforme descrito a seguir:

- posicionar o CP na base da estrutura de suporte, entre dois frisos;
- fixar e ajustar os LVDTs de modo a se obter o registro dos deslocamentos. Para esse estudo o LVDT foi ajustado em aproximadamente 0,5V;
- assentar o pistão de carga e os LVDTs no CP;
- condicionar o CP: aplicar 200 vezes uma carga vertical (F) repetida diametralmente no CP, de modo a se obter uma tensão menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. A frequência de aplicação da carga é de 60 ciclos por minuto, com duração de 0,1 segundo. O registro dos deslocamentos resilientes deve ser feito para 300, 400 e 500 aplicações da carga (F);
- calcular o MR baseado na equação (15), que será uma média dos valores determinados a 300, 400 e 500 aplicações de carga.

### 3.11 DETERMINAÇÃO DO DANO POR UMIDADE INDUZIDA (DUI)

A avaliação do dano causado pela umidade é de grande importância, visto que este afeta diretamente o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. Os testes para identificação do potencial ao dano por umidade em misturas asfálticas podem ser classificados em duas categorias: aqueles realizados em misturas não compactadas e os realizados em misturas compactadas (SOLAIMANIAN *et al.*, 2004). Existe, porém, a dificuldade de associar os resultados de testes obtidos em laboratório com o desempenho das misturas em campo (EPPS *et al.*, 2000).

Para o presente estudo, o teste de sensibilidade à ação deletéria da água foi realizado seguindo o procedimento descrito em NBR 15617(2011) que é baseada na AASHTO T 283 e ASTM D 4867(2009). Este procedimento de ensaio foi elaborado baseado no trabalho de R.P. Lottman (NCHRP Project 4-08), e um

posterior trabalho realizado por D.G. Tunnicliff e R.E. Root (NCHRP Project10-17) (EPPS et al., 2000; MOURA, 2001).

Segundo AASHTO T 283, os CPs podem ser preparados em laboratório seguindo o método Marshall. O procedimento de ensaio pode ser resumido através dos passos descritos a seguir.

- moldar seis CPs com vazios entre 6 e 8% no teor de projeto de ligante;
- separar três desses CPs para aplicação de uma pressão de 254 – 660mm Hg, a fim de obter saturação entre 55 e 80%;
- colocar os três CPs para congelamento (-18°C) por um período mínimo de 16h. Os CPs devem ser cobertos por um filme plástico, colocados dentro de um saco vedado com 10 ml de água;
- imergir os CPs em um banho a 60°C por um período de  $24 \pm 1$ h, após a retirada do filme e do saco plástico;
- retirar os três CPs do banho de 60°C e imergi-los em um banho a 25°C por um período de  $2 \pm 1$ h;
- realizar ensaio de resistência à tração nos três CPs após todo o ciclo de condicionamento (RTu). Os outros três CPs devem ser submetidos ao ensaio de resistência à tração sem o ciclo de condicionamento (RT);
- calcular a resistência à tração retida por umidade induzida, que é a razão entre RTu e RT.

Foram escolhidas para serem ensaiadas as misturas AN, por ser a mistura referência e A40M100, a qual possui 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado de concreto. É esperado que devido ao elevado percentual de substituição de agregado reciclado (100%) e conseqüentemente alta absorção, teoricamente A40M100 é a pior mistura com relação à adesividade e resistência à tração.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MARSHALL E TEOR DE PROJETO

A (Tabela 32) apresenta as características Marshall esperadas conforme ES 31/06 DNIT.

TABELA 32: PROPRIEDADES MARSHALL (DNIT, ES 31/2006).

Características	Método de Ensaio	Camada de rolamento
Vv - Porcentagem de vazios %	DNER-ME 043	3 a 5
RBV - Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75-82
Estabilidade Mínima (kgf) 75 golpes	DNER-ME 043	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima MPa	DNER-ME 138	0,65

No presente estudo as massas específicas aparentes (Gmb), como as massas específicas medidas (DMM) para os cinco tipos de misturas estão nas [(Tabela 33), (Tabela 34),(Tabela 36) e (Tabela 37)]. Para os valores calculados, as massas específicas utilizadas são a média dos três corpos de prova realizados para cada mistura.

Na (Tabela 33) observa-se que para o traço feito apenas com AN os teores de 5,5% e 6,0% de ligante apresentaram um baixo volume de vazios e elevada relação betume/vazios, indicando um excesso de ligante na mistura e fazendo com estes parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela norma DNIT-ES 031/06. Apenas o teor de 5% atingiu todos os limites especificados pelo DNIT.

TABELA 33: CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS AGREGADO NATURAL (AN).

Características Parâmetro de Dosagem Marshall - Traço AN	Teor de Ligante				
	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%
Gmb -Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,418	2,440	2,448	2,464	2,471
DMM - Massa específica real RICE (g/cm <sup>3</sup> )	2,566	2,559	2,530	2,524	2,511
Volume de vazios (Vv) %	5,77	4,65	3,25	2,39	1,60
Vazios do agregado mineral (VAM) %	15,32	15,49	15,33	15,77	16,23
Relação betume/vazios (RBV) %	62,32	69,97	78,82	84,86	90,15
Estabilidade (kgf)	1.290	1.406	1.439	1.375	1.324
Fluência (mm)	4,01	4,30	4,48	4,88	5,42

Para a amostra A20M50 (Tabela 34), os teores de 6,5% e 7,0% apresentaram um baixo volume de vazios e elevada relação betume/vazios, indicando um excesso de ligante na mistura e fazendo com estes parâmetros

ficassem fora dos limites especificados pela norma DNIT-ES 031/06. Ao contrário ocorreu com o teor de 5,0% que apresentou um alto volume de vazios e baixa relação betume/vazios, indicando um falta de ligante na mistura.

TABELA 34: CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS A20M50.

Características Parâmetro de Dosagem Marshall - Traço A20M50	Teor de Ligante				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Gmb -Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,347	2,350	2,354	2,355	2,359
DMM - Massa específica real RICE (g/cm <sup>3</sup> )	2,477	2,464	2,454	2,430	2,412
Volume de vazios (Vv) %	5,25	4,63	4,09	3,10	2,19
Vazios do agregado mineral (VAM) %	16,84	17,29	18,04	18,21	18,49
Relação betume/vazios (RBV) %	68,80	73,38	77,30	82,96	88,14
Estabilidade (kgf)	1.453	1.424	1.445	1.362	1.722
Fluência (mm)	3,80	3,88	4,10	4,63	3,19

Para a amostra A20M100 (Tabela 35) os teores de 5,0% e 5,5% apresentaram um alto volume de vazios (Vv) e baixa relação betume/vazios (RBV), indicando um falta de ligante na mistura, fazendo com estes parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela norma DNIT-ES 031/06.

TABELA 35: CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS A20M100.

Características Parâmetro de Dosagem Marshall - Traço A20M100	Teor de Ligante				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Gmb -Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,249	2,268	2,276	2,297	2,300
DMM - Massa específica real RICE (g/cm <sup>3</sup> )	2,414	2,397	2,380	2,367	2,356
Volume de vazios (Vv) %	6,83	5,39	4,37	2,95	2,38
Vazios do agregado mineral (VAM) %	17,93	17,70	17,85	17,69	18,27
Relação betume/vazios (RBV) %	61,92	69,55	75,52	83,33	87,00
Estabilidade (kgf)	2.035	2.035	1.650	1.523	1.360
Fluência (mm)	4,15	3,73	3,97	3,97	4,63

Os resultados para o traço A40M50 (Tabela 36) os teores de 6,5% e 7% de ligante apresentaram um baixo volume de vazios e elevada relação betume/vazios, indicando um excesso de ligante na mistura, os teores 5,5% e 6,0% atenderam a todos os limites especificados pela norma DNIT-ES 031/06.

TABELA 36: CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS A40M50.

Características Parâmetro de Dosagem Marshall - Traço A40M50	Teor de Ligante				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Gmb -Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,348	2,356	2,358	2,368	2,385
DMM - Massa específica real RICE (g/cm <sup>3</sup> )	2,467	2,464	2,447	2,408	2,404
Volume de vazios (Vv) %	4,84	4,41	3,62	1,68	0,81
Vazios do agregado mineral (VAM) %	16,43	17,20	17,59	16,87	17,29
Relação betume/vazios (RBV) %	70,53	74,37	79,43	90,04	95,30
Estabilidade (kgf)	1.722	1.520	1.449	1.457	1.360
Fluência (mm)	3,19	3,46	3,73	3,91	4,23

Dos resultados para o traço A40M100 (Tabela 37) apenas os teor de 6,0% atendeu a maioria dos limites especificados pela norma DNIT-ES 031/06, exceto o Vv.

TABELA 37: CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS A40M100.

Características Parâmetro de Dosagem Marshall - Traço A40M100	Teor de Ligante				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Gmb -Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,250	2,271	2,280	2,295	2,307
DMM - Massa específica real RICE (g/cm <sup>3</sup> )	2,404	2,402	2,371	2,357	2,344
Volume de vazios (Vv) %	6,39	5,46	3,87	2,63	1,59
Vazios do agregado mineral (VAM) %	17,50	17,79	17,37	17,36	17,53
Relação betume/vazios (RBV) %	63,47	69,33	77,73	84,84	90,91
Estabilidade (kgf)	2.224	2.107	1.888	1.610	1.535
Fluência (mm)	3,93	3,97	3,97	3,57	4,61

Através da análise da (Figura 18), observa-se que existe uma tendência de redução do Vv à medida que se aumenta o teor de ligante, como era de se esperar, uma vez que o CAP acaba preenchendo os vazios entre os agregados.

Verifica-se que para o teor 6,0% o volume de vazios fica muito próximo de 4%, Vv indicado para escolha do teor ótimo de ligante segundo NAPA (1982) e a maioria dos órgãos rodoviários, mostrando que o teor ótimo de ligante das misturas com agregado reciclado situa-se nesta faixa.

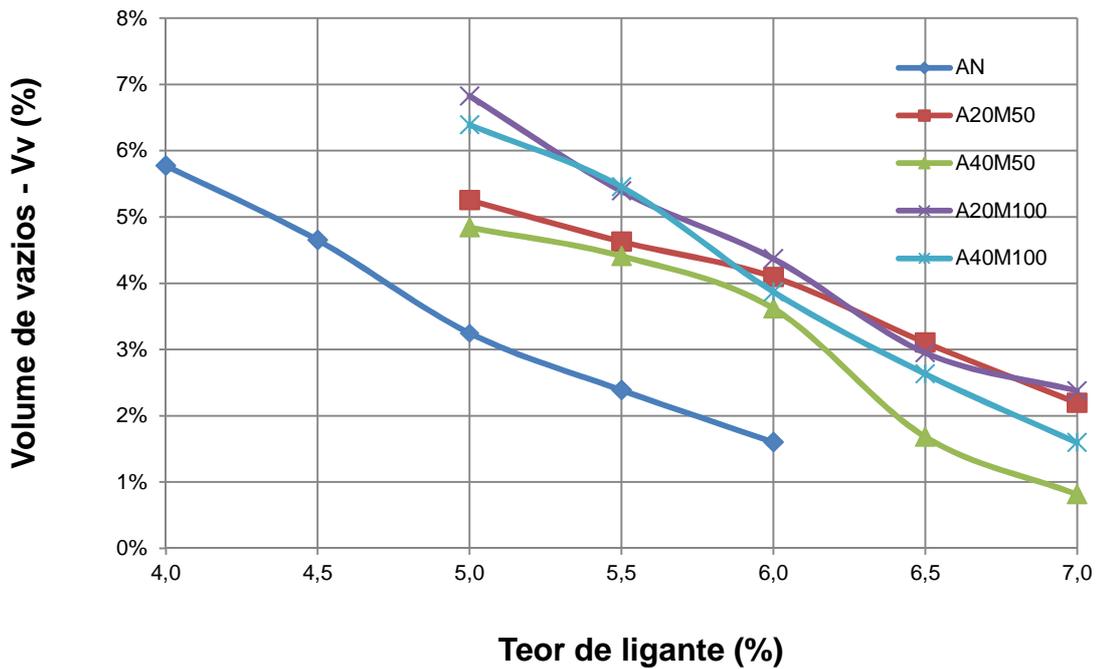


FIGURA 18: VOLUME DE VAZIOS X TEOR DE LIGANTE.

A (FIGURA 19) indica que no intervalo estabelecido pela norma DNIT-ES 031/06 de RBV entre 75% e 82%, as misturas com agregados reciclados se enquadraram com teores de ligantes entre 5,5% e 6,5%.

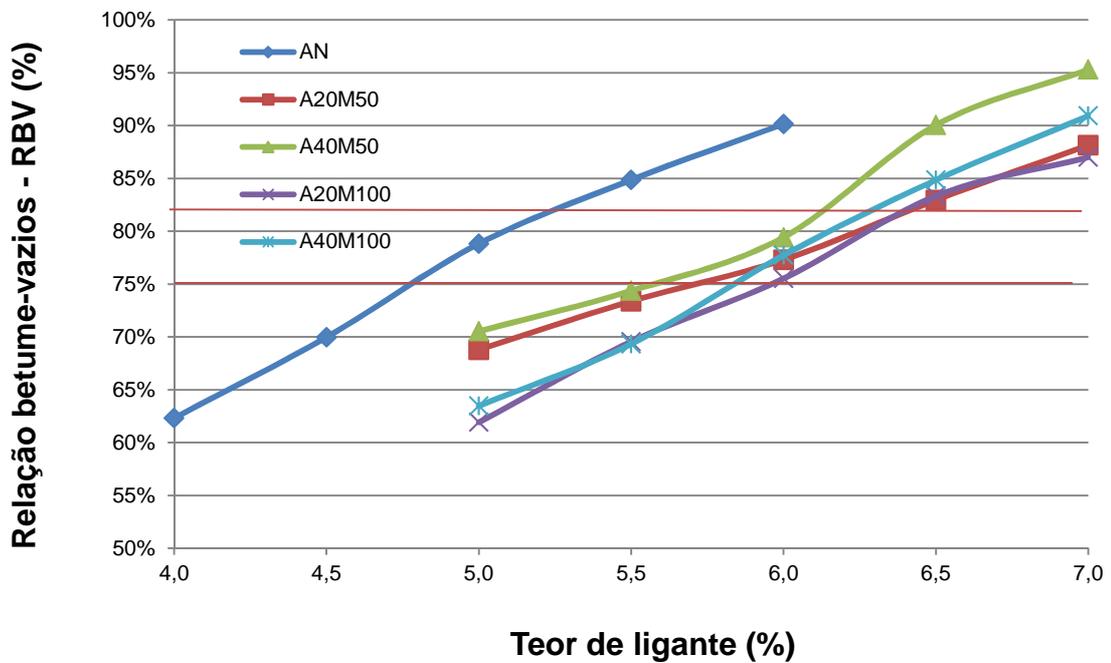


FIGURA 19: RELAÇÃO BETUME / VAZIOS X TEOR DE LIGANTE.

Na (FIGURA 20), nota-se que para os agregados utilizados na pesquisa, que apresentaram dimensão máxima característica de 19,1 mm, o valor mínimo de VAM, de acordo com a norma DNIT 031/06 ES, é de 15%. Todas as misturas atingiram o valor mínimo de VAM.

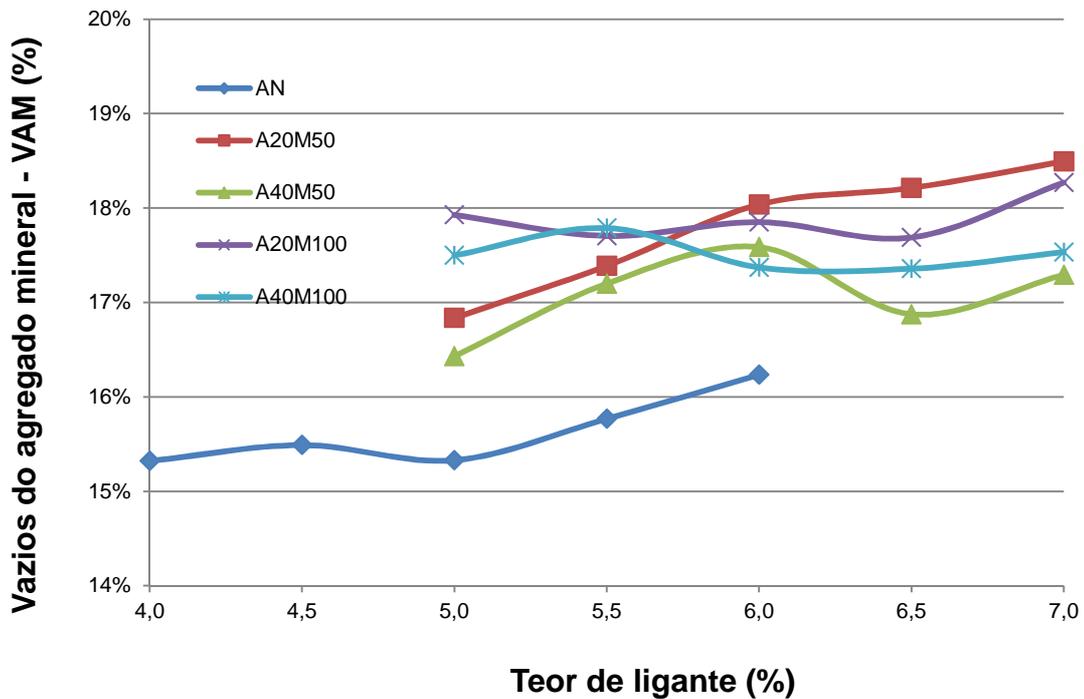


FIGURA 20: VAZIOS DO AGREGADO MINERAL (VAM) X TEOR DE LIGANTE.

Na (FIGURA 21) observa-se que os traços com agregados reciclados apresentaram massa específicas aparentes menores que o do agregado natural, causada provavelmente pela porosidade do agregado reciclado. Quanto maior o percentual de agregado reciclado na mistura menor a sua massa específica, verifica-se isto nos traços A20M100 e A40M100 que são os traços com menores massas específicas aparentes de todas as misturas estudadas neste trabalho.

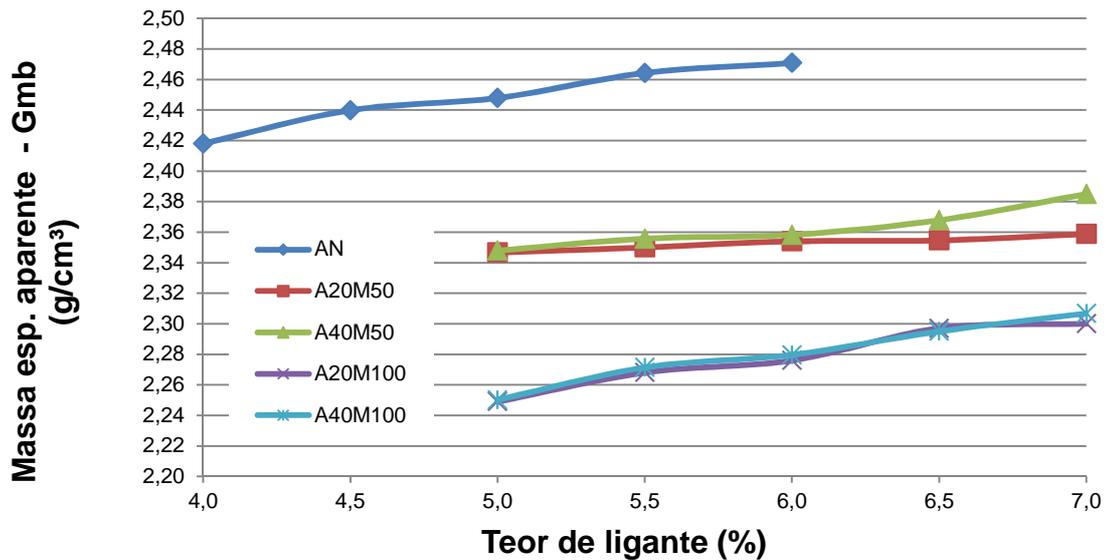


FIGURA 21: MASSA ESPECÍFICA APARENTE (GMB) X TEOR DE LIGANTE.

Na (FIGURA 22) nota-se que, para todos os traços, à medida que aumenta o teor de ligante diminui a DMM, pois ao aumentar o volume de asfalto na mistura diminui proporcionalmente o volume de agregados implicando na diminuição da densidade da mistura. Além disso, nota-se que a DMM para os traços A20M50 e A40M50 ficaram com valores próximos, indicando que pode não haver correlação nenhuma com uma maior DMM com a maior classe de resistência do concreto origem do agregado reciclado.

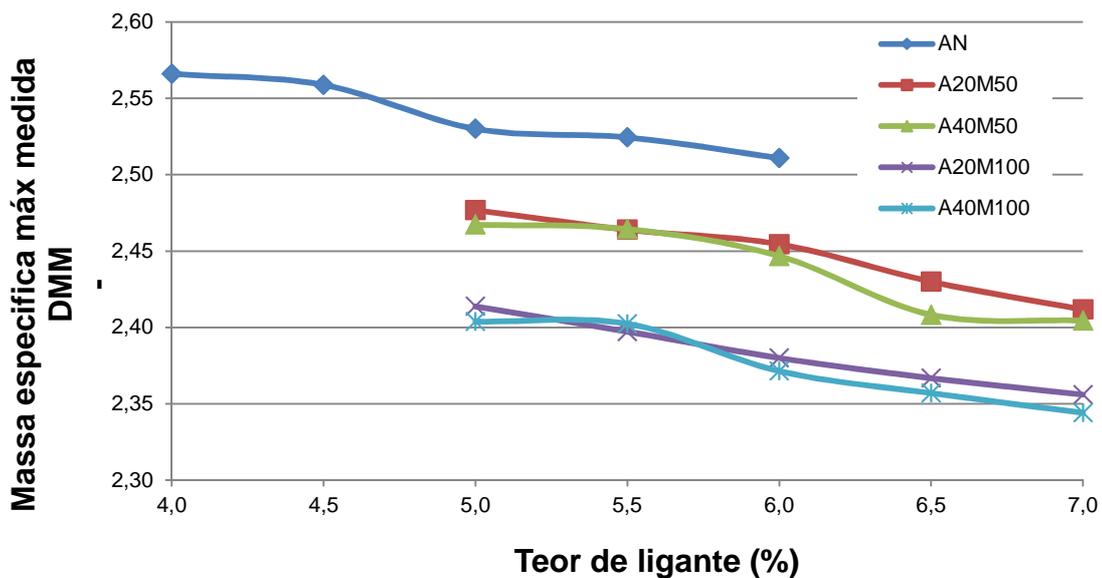


FIGURA 22: MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA MEDIDA (DMM).

A estabilidade desejável é a máxima entre todos os traços de dosagem. De acordo com a (FIGURA 23) para todos os traços a estabilidade máxima foi para o teor 5%. Logo o teor “ótimo” para estes traços situam-se entre 5,0% e 6,0%. Se observa aqui uma tendência de diminuição da estabilidade com o aumento do teor de ligante.

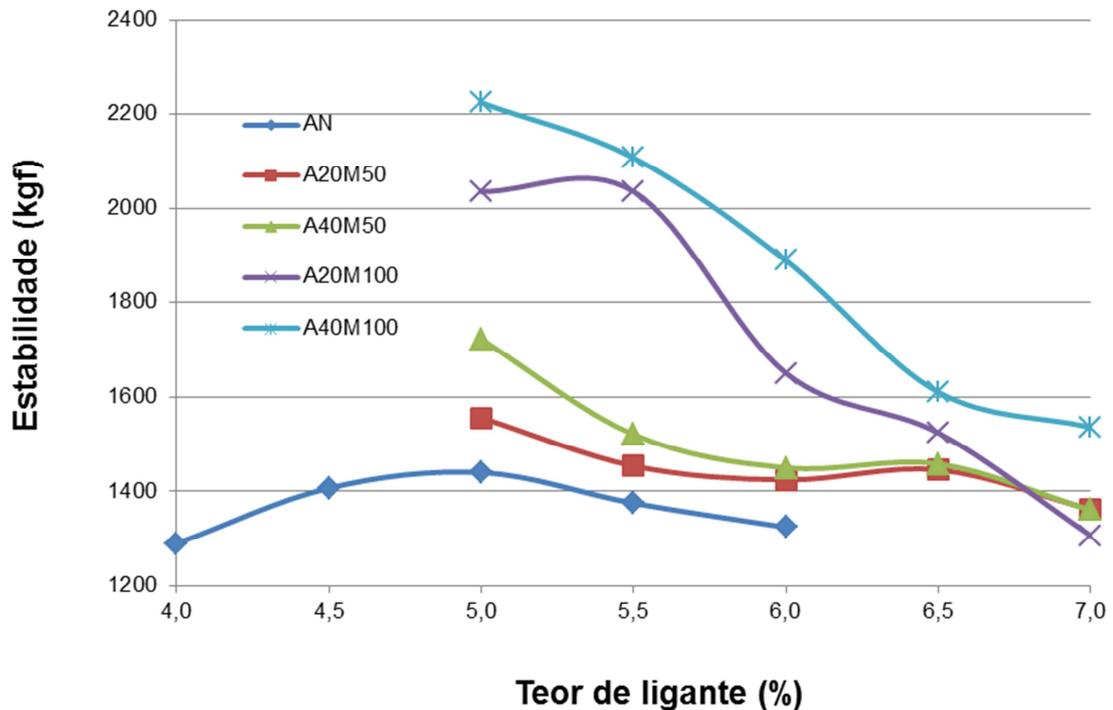


FIGURA 23: ESTABILIDADE X TEOR DE LIGANTE.

A (TABELA 38) apresenta o resultado do cálculo do teor ótimo de ligante para cada mistura obtido através do parâmetro Vv de 4%.

TABELA 38: TEOR DE PROJETO DO LIGANTE ASFÁLTICO.

Método	AN	A20M50	A20M100	A40M50	A40M100
Vv de 4%	4,9%	6,0%	6,1%	5,8%	6,0%

## 4.2 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Na (Tabela 39) e (Figura 24) verifica-se que a mistura referência AN foi a que obteve a menor deformação, ficando inclusive dentro de padrões para ser utilizada em vias de tráfego intenso, mesmo utilizando um menor teor de ligante

(4,9%) comparado às misturas com agregado reciclado miúdo de concreto, verifica-se um melhor desempenho quanto ao afundamento.

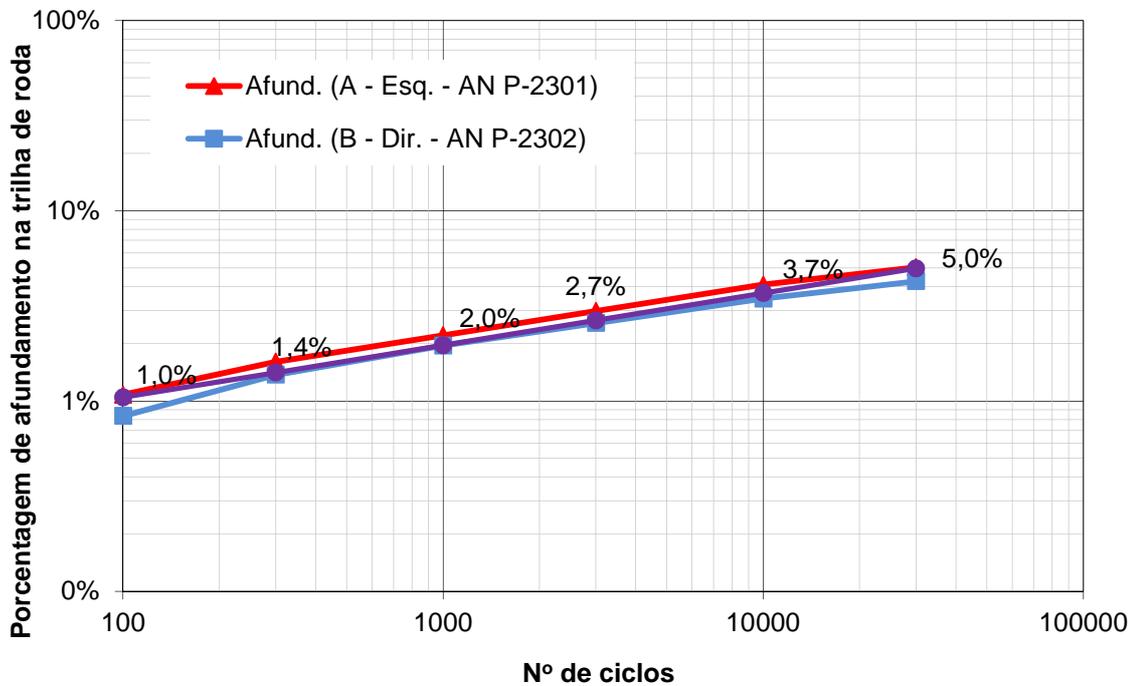


FIGURA 24: DEFORMAÇÃO PERMANENTE AN.

Na (Tabela 39) e (Figura 25) verifica-se que a mistura A20M50 obteve resultados muito próximos da mistura referência, das misturas recicladas foi a que obteve a menor deformação, ficando muito próximo de padrões para ser utilizada em vias de tráfego intenso, utilizando um teor de ligante maior (6,0%) que a mistura referência (4,9%).

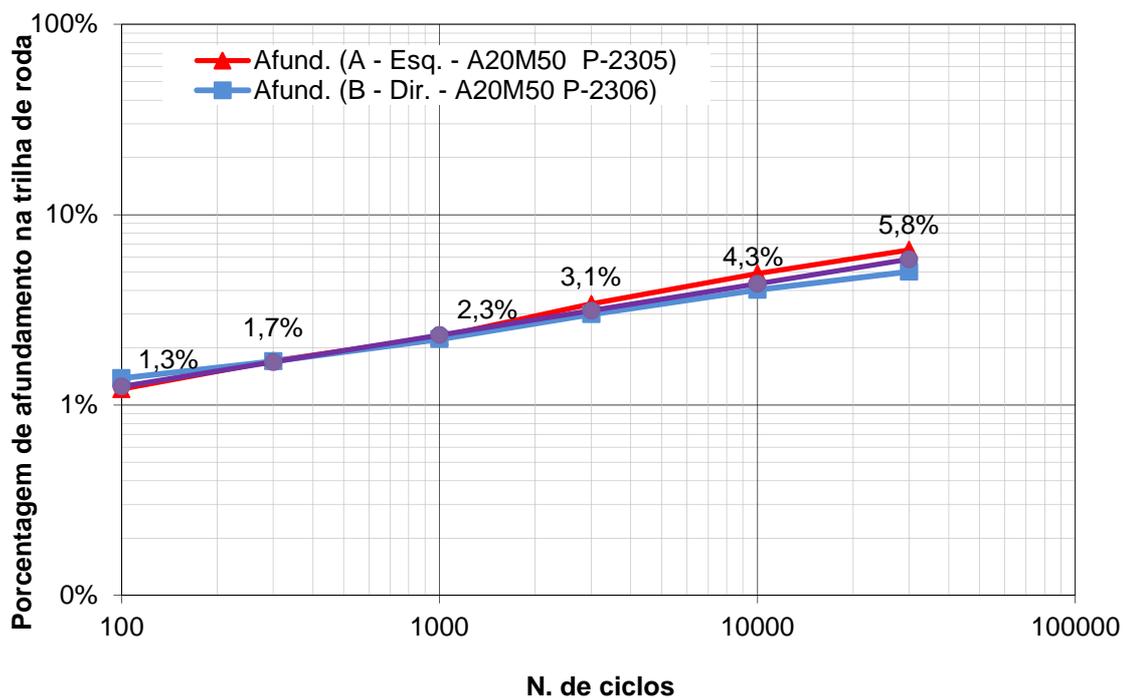


FIGURA 25: DEFORMAÇÃO PERMANENTE A20M50.

Na (Tabela 39) e (Figura 26) verifica-se que a mistura A20M100 obteve resultados melhores que a mistura A40M100, nos primeiros ciclos conforme mostra a (Figura 28), porém nos últimos ciclos, ficaram muito próximos os resultados de ambas indicando a utilização apenas em vias de baixo volume de tráfego.

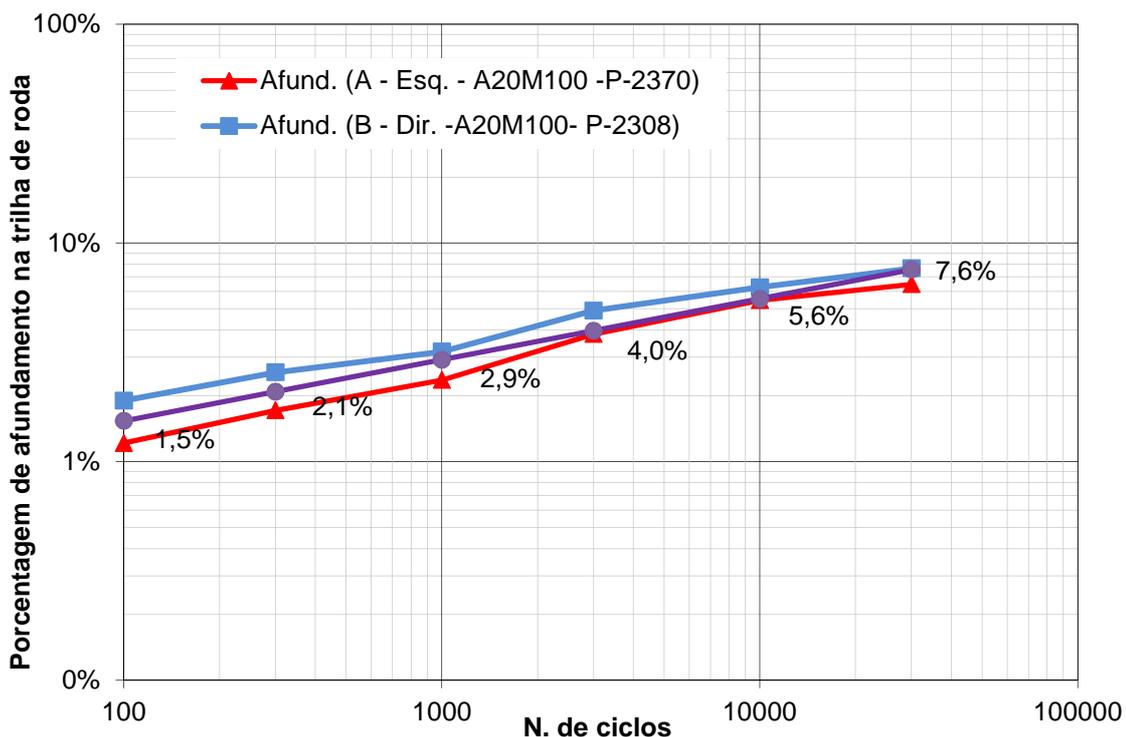


FIGURA 26: DEFORMAÇÃO PERMANENTE A20M100.

Na (Tabela 39) e (Figura 27) verifica-se que a mistura A40M50 obteve resultados melhores que a mistura A40M100 (Figura 28), nos últimos ciclos. Isso provavelmente se deve ao fato da mistura utilizar um menor percentual de agregado reciclado, resultados indicam que ambas podem ser utilizadas apenas em vias de baixo volume de tráfego.

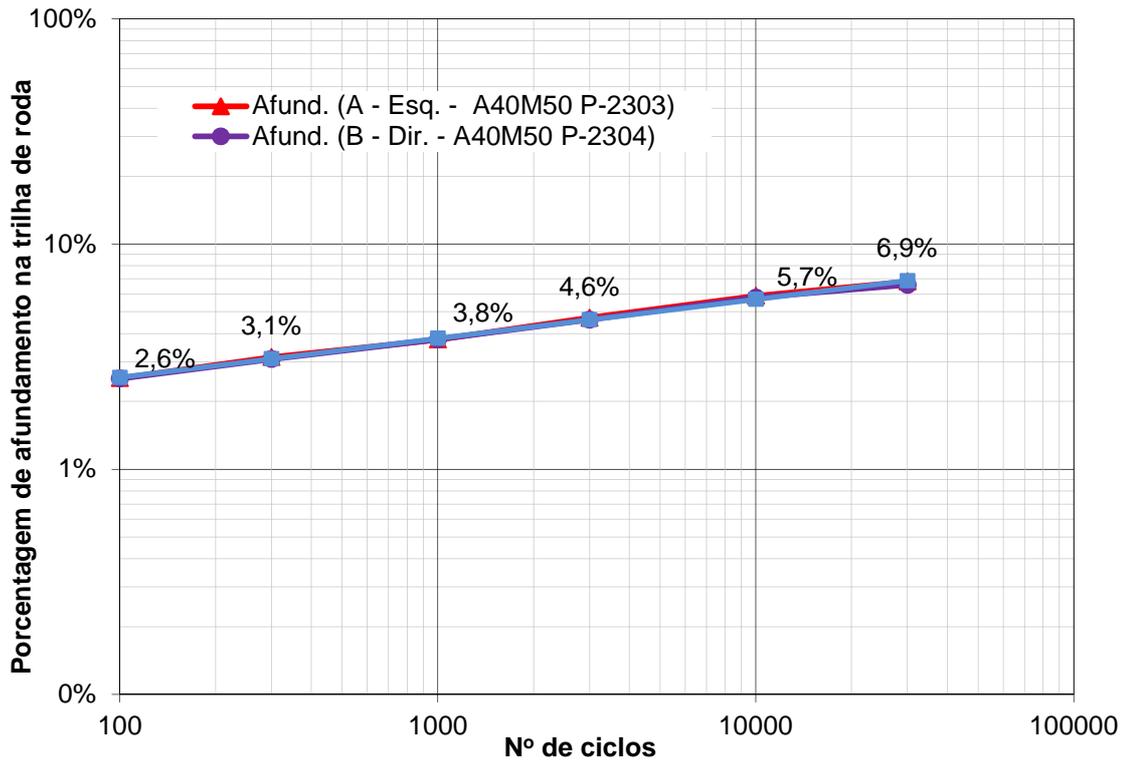


FIGURA 27: DEFORMAÇÃO PERMANENTE A40M50.

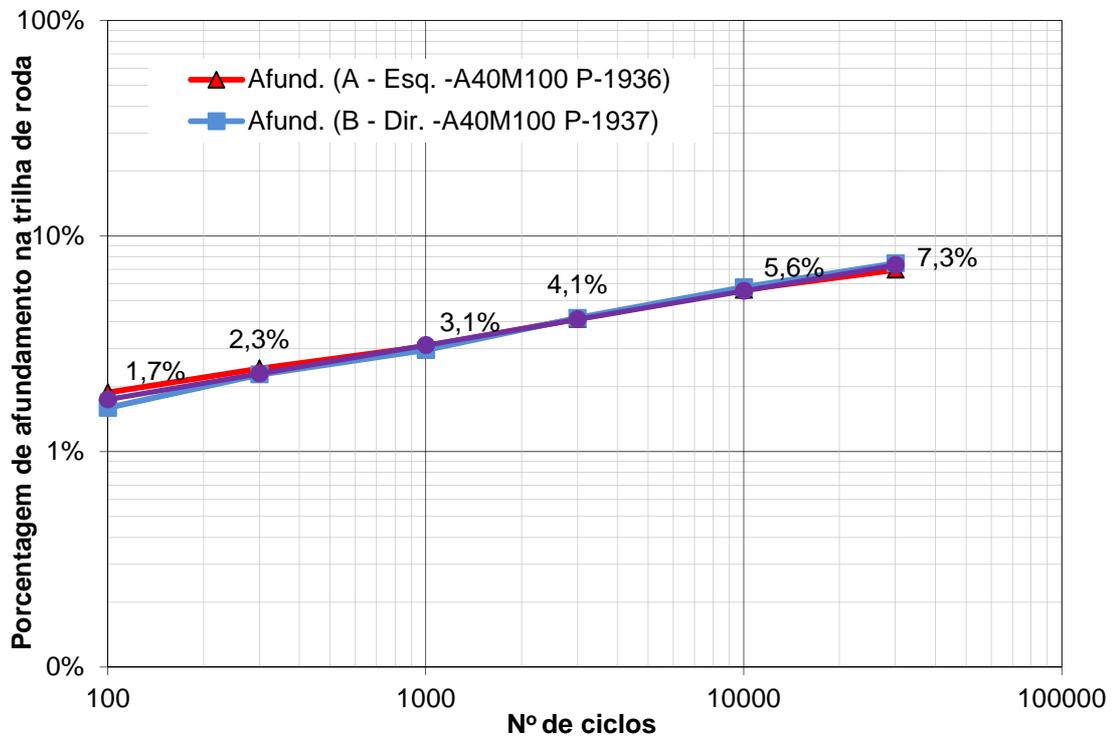


FIGURA 28: DEFORMAÇÃO PERMANENTE A40M100.

TABELA 39: RESULTADOS DEFORMAÇÃO PERMANENTE.

Resultados Deformação Permanente	Número de ciclos					
	100	300	1000	3000	10.000	30.000
Mistura AN	1,0%	1,4%	2,0%	2,7%	3,7%	5,0%
Mistura A20M50	1,3%	1,7%	2,3%	3,1%	4,3%	5,8%
Mistura A20M100	1,5%	2,1%	2,9%	4,0%	5,6%	7,6%
Mistura A40M50	2,6%	3,1%	3,8%	4,6%	5,7%	6,9%
Mistura A40M100	1,7%	2,3%	3,1%	4,1%	5,6%	7,3%

Na (Figura 29) têm-se os resultados de deformação permanente médio de todas as misturas, onde fica fácil visualizar uma tendência de aumento da deformação permanente à medida que se aumenta o teor de agregado reciclado. Observa-se ainda diferença insignificante entre as amostras A20M100 e A40M100, indicando que não houve influência da variável resistência do agregado. Apenas a mistura A40M50 apresentou um resultado atípico, que pode ter sido influenciado pelo processo de mistura e/ou compactação.

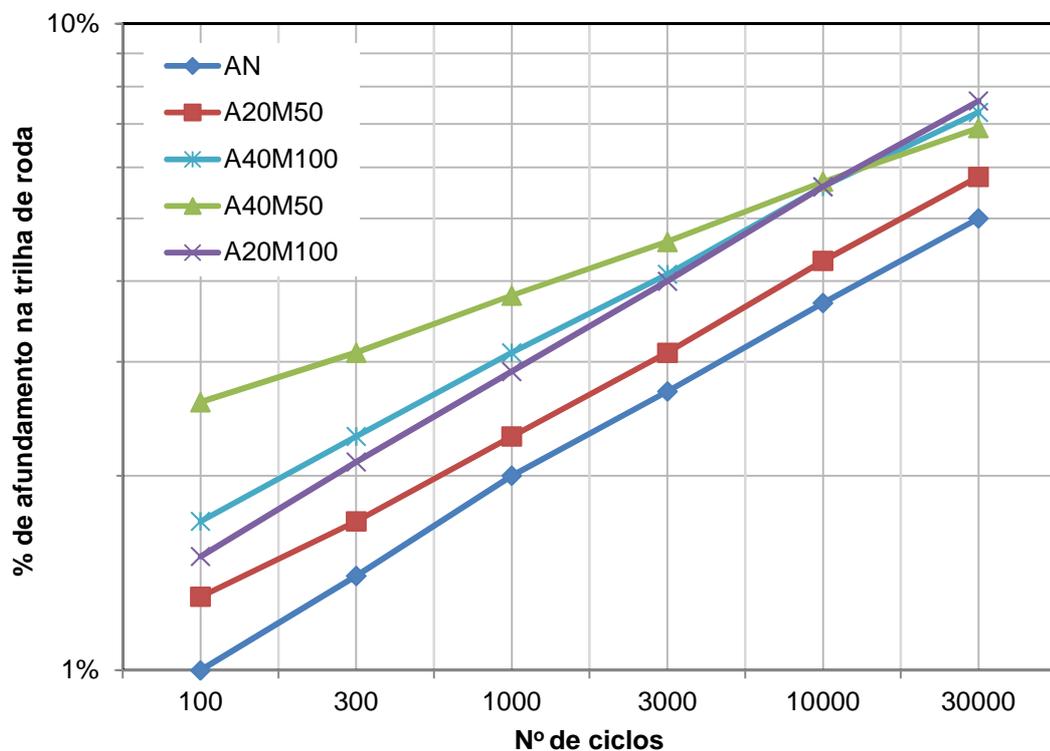


FIGURA 29: RESULTADOS DEFORMAÇÃO PERMANENTE DAS MISTURAS.

Em resumo, os resultados das misturas com agregado reciclado de concreto encontram-se acima do limite de 5% estipulado pelo grupo europeu de

especificações para misturas asfálticas submetidas a tráfego intenso e pesado, e empregadas como camada de rolamento, porém inferiores aos 10% para misturas asfálticas utilizadas como camada de rolamento e submetidas a tráfego médio e leve (BELIGNI *et al.*, 2000).

#### 4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados obtidos para as misturas analisadas estão resumidos na (Tabela 40), onde o resultado é uma média do ensaio de três corpos de prova para cada mistura, os valores médios de RT se situaram entre 1,38 e 1,54 MPa. Segundo Bernucci *et al.* (2007) os valores médios de RT para as misturas asfálticas a quente situam-se entre 0,5 MPa e 2,0 MPa.

Vale salientar que os CPs no teor de projeto confeccionados para execução dos ensaios mecânicos foram moldados a 75 golpes para as dosagens Marshall. Nota-se um valor de RT maior para a mistura com maior percentual de substituição de agregado reciclado, o que pode ser um indício de maior aderência da película de ligante ao agregado nas misturas com maior teor de agregado reciclado. Valores altos de RT (alta resistência à tração) indicam maior resistência a ruptura e conseqüentemente, maior resistência à fadiga. Todas as misturas atingiram o valor de RT mínimo especificado pelo DNIT 031/2004-ES de 0,65 MPa.

TABELA 40: RESULTADOS RT AN, A40M50 E A40M100.

Misturas	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)
AN	1,36	1,39		1,38
A40M50	1,38	1,44	1,50	1,44
A40M100	1,39	1,62	1,60	1,54

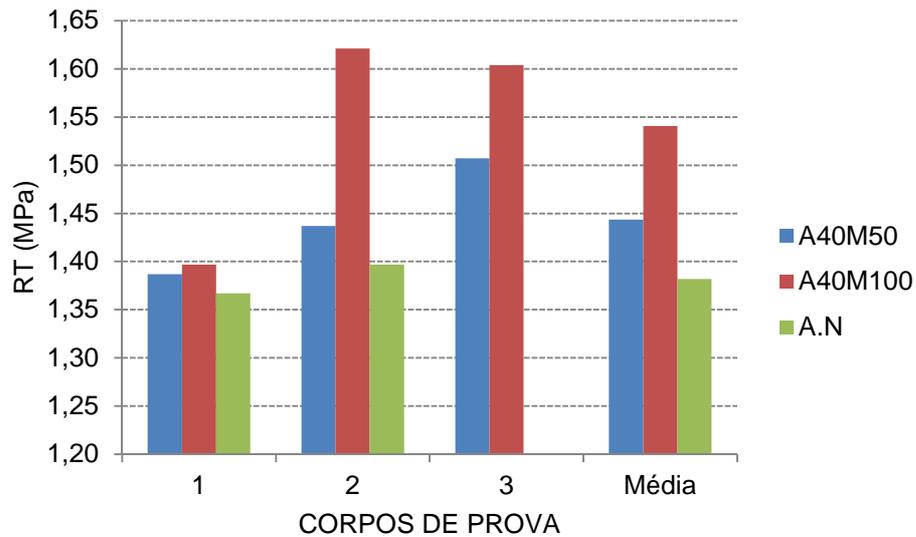


FIGURA 30: RESULTADOS RT AN, A40M50 E A40M100.

#### 4.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os resultados obtidos para as três misturas analisadas encontram-se resumidos na (Tabela 41) e podem ser visualizados na (Figura 31). Os valores apresentados são a média aritmética de três corpos de prova. Conclui-se que a mistura referência têm maior módulo de resiliência, ou seja, maior capacidade de carga que as misturas com agregado reciclado, no entanto a análise dos valores de MR é bastante complexa, valores maiores ou menores podem ser tolerados dependendo das demais camadas que constituem o pavimento como um todo.

TABELA 41: RESULTADOS MR AN, A40M50 E A40M100.

Misturas	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)
A.N	4.211	4.536	-	4.373,5
A40M50	3.346	3.090	3.957	3.464
A40M100	4.031	3.669	4.306	4.002

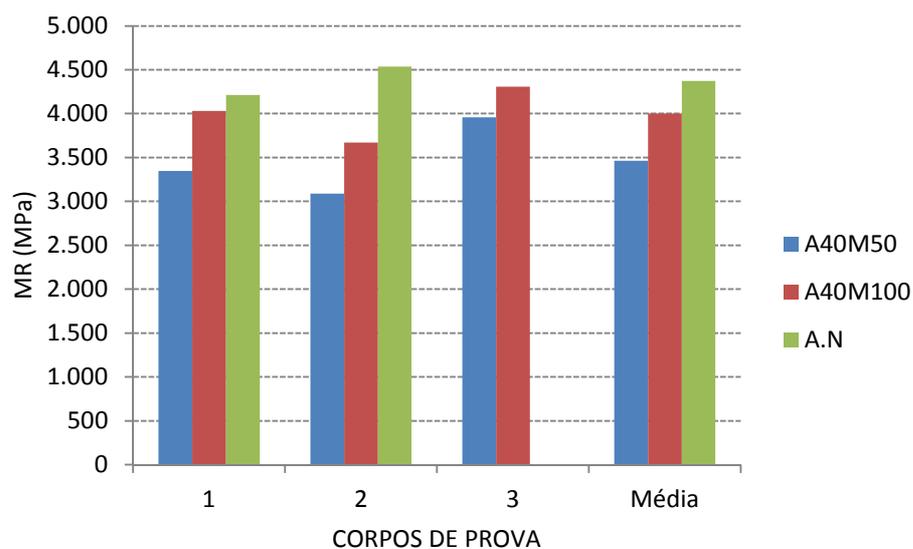


FIGURA 31: RESULTADOS MR DAS MISTURAS.

Foi avaliado também o valor de MR/RT. Para o presente estudo obtiveram-se os valores descritos na (Tabela 42) e ilustrados na (Figura 32).

TABELA 42: RESULTADOS MR/RT A40M50 E A40M100.

Misturas	MR/RT
AN	3.165
A40M50	2.400
A40M100	2.598

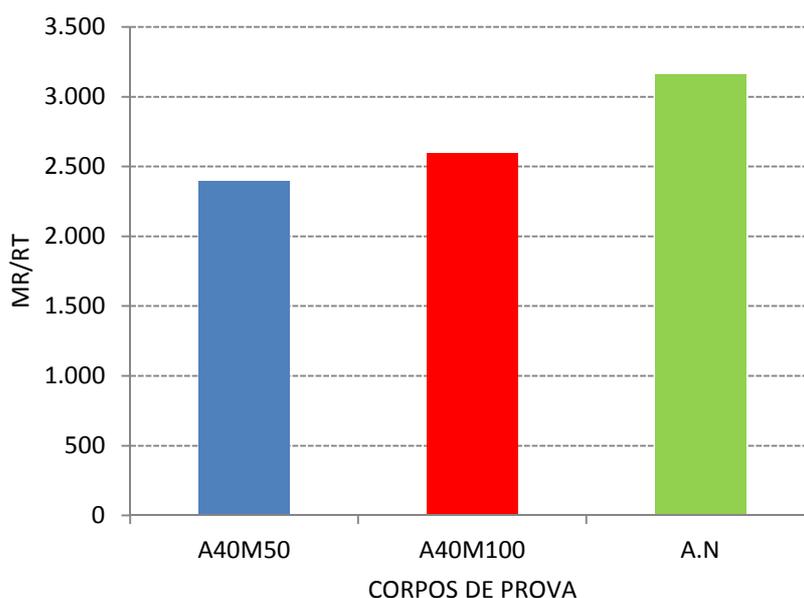


FIGURA 32: RESULTADOS MR/RT AN, A40M50 E A40M100.

Segundo Bernucci *et al.* (2007) quanto menor o valor dessa razão, maior será a vida de fadiga obtida para esse mesmo tipo de mistura asfáltica. Para as três misturas estudadas, a razão MR/RT variou de 2.400 a 3.165. As misturas com agregado reciclado de concreto apresentaram menor relação MR/RT que a mistura referência, indicando um melhor resultado para as misturas com agregado reciclado.

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DO DANO POR UMIDADE INDUZIDA

Observando os corpos de prova (Figura 33) rompidos no ensaio de Lottman, fica demonstrado que ocorreu o rompimento de agregados, porém não apresentando descolamento da película asfáltica na mistura A40M100. O corpo de prova da esquerda foi o que sofreu condicionamento (saturação, congelamento e aquecimento em água) e o da direita não sofreu condicionamento.

A (Tabela 43) apresenta os resultados obtidos das misturas AN e A40M100, compactada pelo Marshall, para a resistência à tração por compressão diametral após o condicionamento (saturação, congelamento e aquecimento em água), a resistência à tração por compressão diametral sem condicionamento e a resistência à tração retida por umidade induzida (RRT).



FIGURA 33: ASPECTO DO PLANO DE RUPTURA APÓS ENSAIO RRT NA MISTURA A40M100.

Observa-se na (Tabela 43) que a mistura A40M100, apresentou valor de RRT superior a 80%, que segundo Moura (2001) deve ser o limite para que a amostra seja aprovada. O valor de 96,8% para a mistura A40M100 foi alto provavelmente devido à alta porosidade dos agregados e alta absorção do asfalto na mistura, pois o ligante absorvido para dentro dos poros deve servir como ancoragem deste ao agregado na mistura. Para a mistura referência AN, não houve descolamento da película de ligante do agregado miúdo pó de pedra apesar do valor de 41,3% ficar acima do limite estabelecido por norma para perda por dano de umidade induzida que é de até 30%.

TABELA 43: RESULTADO DE DANO POR UMIDADE INDUZIDA A40M100.

Corpo de Prova	RTI (MPa)	RTI' (MPa)	RRT(%)
AN	0,9048	0,3724	41,3
A40M100	1,1564	1,127	96,8

#### 4.6 CUSTOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Foi realizada análise preliminar do custo (R\$/t) das misturas asfálticas com agregados naturais em comparação com as misturas asfálticas com agregados miúdos reciclados, baseadas em composições de custo fornecidas pelo DNIT, valores médios dos agregados naturais pesquisados nas pedreiras locais, valores médios para os agregados reciclados pesquisados nas usinas de reciclagem localizadas na região metropolitana de Curitiba e o valor do CAP pesquisado em usinas de asfalto locais. Os valores utilizados para a composição do preço, bem como as densidades dos materiais utilizadas para o cálculo estão apresentados na (Tabela 44).

Os custos de equipamento e mão de obra foram obtidos do Sistema de Custos Unitários do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, para o estado do Paraná, com valores de Novembro de 2012, conforme o custo unitário de referência número 5 S 02 540 01, para concreto betuminoso usinado a quente – capa de rolamento. Desta forma, considerando os teores ótimos de ligante e a composição de agregados da mistura, calculados os custos para execução da camada de rolamento em concreto betuminoso usinado a quente para as cinco misturas estudadas.

TABELA 44: CUSTO UNITÁRIO INSUMOS (2013).

Material	Densidades	Custo Unitário	
	t/m <sup>3</sup>	R\$/m <sup>3</sup>	R\$/t
AN - Brita 1	1,5	R\$ 63,00	R\$ 42,00
A20 - Miúdo	1,5	R\$ 30,00	R\$ 20,00
A40 - Miúdo	1,5	R\$ 30,00	R\$ 20,00
Pó de pedra	1,5	R\$ 40,00	R\$ 26,67
CAP 50/70	1,02		R\$ 1.080,00

A (Tabela 45) mostra o comparativo de custo entre as misturas asfálticas utilizando agregados miúdos reciclados de concreto e as misturas asfálticas utilizando agregados miúdos naturais.

O aumento do custo foi inexpressivo nas misturas com 50% de substituição, e menos de 7% nas misturas com 100% de substituição do agregado natural por agregado reciclado miúdo de concreto, indicando uma possível

viabilidade econômica para as misturas com 50% de agregado reciclado. Verifica-se que as misturas com maior teor de substituição de agregado reciclado de concreto e conseqüente maior teor de ligante, são as misturas que tiveram um maior aumento no custo por tonelada.

TABELA 45: COMPARATIVO DE CUSTO ENTRE AS MISTURAS.

Material	Custo dos materiais (R\$/t)	AN	A20M50	A20M100	A40M50	A40M100
			50% de substituição	100% de substituição	50% de substituição	100% de substituição
AN - Brita 1	R\$ 42,00	19.0%	18,8%	18,8%	18,8%	18,8%
A20 - Miúdo	R\$ 20,00		27,3%	54,5%		
AN - Pedrisco	R\$ 16,06	20.9%	20,7%	20,7%	20,7%	20,7%
A40 - Miúdo	R\$ 20,00				27,3%	54,5%
Pó de pedra	R\$ 26,66	55.2%	27,3%		27,3%	
CAP 50/70	R\$ 1.080,00	4.9%	6,0%	6,1%	5,8%	6,0%
Materiais (R\$/t) (1)		R\$ 78,97	R\$ 83,28	R\$ 87,98	R\$ 81,16	R\$ 86,92
Transporte (R\$/t)		R\$ 49,66	R\$ 49,66	R\$ 49,66	R\$ 49,66	R\$ 49,66
Mão de obra (R\$/t)		R\$ 8,74	R\$ 8,74	R\$ 8,74	R\$ 8,74	R\$ 8,74
Custo total (R\$/ton)		R\$ 137,37	R\$ 141,68	R\$ 146,38	R\$ 139,56	R\$ 145,32
Acréscimo (%) (2)		-	3,0%	6,2%	1.6%	5,5%

(1) Custo dos materiais em R\$/t.

(2) Acréscimo no custo, em percentual, em comparação ao custo da mistura AN

Conforme se observa na Tabela 45, os custos das misturas com agregados reciclados miúdos de concreto chegam a ser 1,6% a 6,26% mais elevados que a mistura contendo apenas agregado natural.

Esse fato se deve ao maior consumo de ligante, que, conforme já verificado, aumenta em função do acréscimo de ARCM à mistura, devido à maior absorção e porosidade dos ARCM.

Esta análise foi feita considerando o mercado de Curitiba/PR. A análise de viabilidade econômica deve ser realizada em função do mercado local, uma vez que o preço de venda dos materiais pode variar largamente para diferentes cidades do país em função do custo de produção, qualidade do agregado e distância de transporte.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar propriedades volumétricas, físicas e mecânicas para emprego de agregado reciclado miúdo de concreto de misturas asfálticas do tipo CBUQ, dosadas pelo método Marshall, quando substituiu-se o agregado miúdo do tipo pó de pedra por agregado miúdo reciclado de concreto na forma de agregado miúdo (4,8 mm), substituindo-se o agregado miúdo natural (pó de pedra) na composição das misturas por agregado reciclado em proporções que variaram entre 0% (mistura de referência), 50% e 100%, respeitando-se a composição granulométrica da faixa “C” do DNIT. A metodologia de dosagem utilizada para as cinco misturas híbridas foi a mesma empregada na mistura de referência e seguiu todos os passos contidos na norma brasileira para dosagem Marshall.

As principais conclusões sobre o tema proposto, fundamentadas em literatura e nos ensaios realizados nas misturas adotadas, demonstram que:

- foi possível obter resultados de parâmetros volumétricos da dosagem Marshall dentro das especificações, mesmo quando utilizou-se 100% de agregado miúdo reciclado de concreto;
- a massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) e a massa específica máxima medida (DMM) são aproximadamente 5% menores para as misturas contendo o agregado reciclado de concreto comparadas a mistura com 100% de agregado natural. Os valores de  $G_{mb}$  e DMM diminuem à medida que se aumenta o teor de agregado reciclado;
- os vazios dos agregados minerais (VAM) e o volume de vazios ( $V_v$ ) das misturas contendo ARCM foram maiores do que aqueles para a mistura de referência, justificando a relação betume vazios para as misturas contendo ARCM serem menores do que a mistura referência,
- de uma forma geral, não observou-se diferença significativa nos resultados dos ensaios quando trocava-se o agregado reciclado de 20 MPa pelo de 40

MPa;

- o volume de vazios ( $V_v$ ) e conseqüentemente a absorção de asfalto é maior nas misturas com 100% de substituição de agregado reciclado do que as com 50% de substituição de agregado reciclado, pois a absorção está diretamente relacionada a porcentagem de interstícios (poros) e quanto maior o percentual de agregado reciclado maior o percentual de poros que podem ser preenchidos com água ou asfalto;
- no teor de projeto escolhido a  $V_v$  de 4%, todos os parâmetros atendem aos limites estabelecidos, indicando a viabilidade do uso de agregados reciclados miúdos de concreto no CBUQ;
- as misturas com agregado reciclado miúdo de concreto apresentaram resultados de estabilidade e fluência satisfatórios, bem como a mistura de referência;
- verificou-se neste estudo um acréscimo no percentual de ligante das misturas com agregado reciclado. Tal aumento foi maior à medida que se aumentava o teor de agregado miúdo reciclado na mistura, porém um aumento discreto e muito próximo dos teores comumente utilizados em misturas. Obteve-se um teor ótimo de ligante para a mistura de referência de 4,9%, enquanto para a mistura com 100% de ARcm o teor ótimo subiu para 6,1%;
- os resultados de MR, RT e MR/RT estão dentro da faixa de misturas já estudadas no País com o CAP 50/70. A mistura com 100% de agregado reciclado superou o limite de RT estabelecido por norma;
- o resultado da determinação do dano por umidade induzida foi satisfatório para a mistura com 100% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado e foi insatisfatório para a mistura de referência (AN), ou seja, com 100% de pó de pedra como agregado miúdo. Acredita-se que a porosidade do agregado reciclado pode ter auxiliado na aderência por absorver parte do ligante, formando uma espécie de ancoragem. Observou-se um total

- descolamento do ligante da superfície do pó de pedra;
- os resultados de deformação permanente foram semelhantes e satisfatórios para as quatro misturas analisadas com agregado reciclado, atendendo aos limites estabelecidos em normas para vias de baixo volume de tráfego. Apenas a mistura AN atendeu ao requisito de deformação permanente para alto volume de tráfego. A semelhança dos resultados obtidos na deformação permanente para as diversas misturas em CBUQ é provavelmente devida a dois fatores: o controle da granulometria da fração miúda peneira a peneira e a pouca variabilidade de natureza dos constituintes do ARC;
  - O custo por tonelada de CBUQ (R\$/t) comparado entre a mistura com agregado natural e as misturas com até 50% de substituição por agregado miúdo reciclado de concreto, apresentou um aumento (1,6 a 3%), porém para as misturas com 100% de substituição por agregado reciclado teve um aumento de custo próximo a 6%;
  - Ainda é precipitado dizer que os resultados sobre seu desempenho são conclusivos, pois é um material em estudo e ainda sem normas específicas para uso em concretos betuminosos a quente como capa de rolamento em pavimentação.

## 6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Realizar as mesmas misturas, porém dosadas com a Metodologia Superpave repetindo os ensaios e comparar os resultados.

Realizar as mesmas misturas, porém aguardar a homogeneização da mistura em estufa por 2 horas antes da moldagem dos corpos de prova, na temperatura de compactação. O objetivo é simular as condições de transporte da mistura da usina até o local de aplicação. Neste espaço de tempo, ao se utilizar agregados com alta absorção, o ligante tende a ser absorvido pelo mesmo, o que pode induzir dosagens com teores efetivos reduzidos, prejudicando as propriedades mecânicas e contribuindo para uma menor vida de serviço.

Realizar tratamento prévio do agregado reciclado de concreto com emulsão de cal para minimizar o efeito da absorção.

Realizar misturas tipo emulsões asfálticas com a utilização do agregado reciclado de concreto.

Realizar as misturas recicladas com asfalto-borracha para avaliar a possibilidade de redução do consumo de ligante.

Avaliar a resistência à fadiga das misturas.

Avaliar a influência do aumento do número de golpes e grau de compactação das misturas híbridas na melhoria das propriedades mecânicas e na redução da deformação permanente.

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.

## REFERÊNCIAS

ABEDA. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. 2ª ed., Rio de Janeiro, 2010.

ABRECON, 2013. **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição**. Disponível em: <http://www.abrecon.org.br/>. Acesso em 11/05/2013.

ABREPEL, 2011. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010**. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download/Panorama2010.pdf>>. Acesso em: 11/05/2013.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **EN 12697-33**: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 33: Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque, Paris, 2003.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF EN 12697-22**: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud– Partie 22: Essai d'orniérage., France, 2003.

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)**. 161 f. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DOS TRANSPORTES (ANTT). **Anuário Estatístico de Transportes - Perfil Rodoviário (período 2004 a 2008) 2009**. Brasília, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2013**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso: 05/05/2013.

Brasil. **Resolução ANP nº 19**, de 11 de julho de 2005. Estabelece para o cimento asfáltico de petróleo o regulamento técnico ANP N° 03/2005, que acompanha esta Resolução sobre Agência Nacional do Petróleo, Brasília, 2005.

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

AGRELA, F.; JUAN, M.S.; AYUSO, J.; GERALDES, V.L.; JIMÉNEZ, J.R. **Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 3950-3955. 2011.

AHLRICH, R.C **Influence of Aggregate Properties on Performance of Heavy-Duty Hot-mix Asphalt Pavements**. *Transportation Research Record*, n. 1547, p.7-14. 1996.

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.

ARABANI, M; AZARHOOSH, A.R. **The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures**. In: *Construction and Building Materials*, v. 35. p. 1-7. Rasht, Iran, 2012.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. Manual series n. 4 (MS-4), 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto — Procedimentos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2005.

\_\_\_\_\_.**NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação – Procedimentos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2001.

\_\_\_\_\_.**NBR 12891**: Dosagens de misturas betuminosas pelo método Marshall – Procedimentos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1993.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 15617:** Misturas asfálticas — Determinação da resistência ao dano por umidade induzida– Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 15619:** Misturas asfálticas — Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas– Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2009.

ANGULO, S.C. et al. . V.M. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: V Seminário de Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. IBRACON CT-206/IPEN. São Paulo. 2002. p. 293-308.

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, São Paulo, 2003.

BELIGNI, Mauro, VILLIBOR, Douglas F., CINCERRE, José R., 2000, “Mistura Asfáltica do Tipo SMA (Stone Mastic Asphalt): Solução para Revestimentos de Pavimentos de Rodovias e Vias Urbanas de Tráfego Intenso”. In: **Anais** da Reunião Anual de Pavimentação – 32º RAPv, v. 01, pp. 590-605, Brasília,

Distrito Federal, Brasil, 16-20 Outubro.

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

BIRD, R.N.; HEIDRICH, O.; HUANG, Y. **A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements**. Resources, Conservation & Recycling 52 (2007); p. 58-73.

Brasil. Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

Brasil. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providencias. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 ago. 2010.

Brasil. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o comitê interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a implantação dos Sistemas de Logística Reversa e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 23 dez. 2010.

Brasil. SNIS. Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2008, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 ago. 2010.

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.

CERATTI, J.A.; REIS, R.M.M. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, Instituto Pavimentar, 2011.

CHEN, Meizhu; LIN, Juntao; WU, Shaopeng. **Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture**. In: Construction and Building Materials. v. 25. p. 3909-3914. Wuhan, China, 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.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Relatório Gerencial. Pesquisa Rodoviária 2012**. CNT, SEST, SENAT. 409p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT-005/2003-TER**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos, Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **DNIT 031/2006 ES**: Pavimentos flexíveis- concreto asfáltico- especificação de serviço, Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **Manual de pavimentação**, Rio de Janeiro, 2ª ed. 1996, 320p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/98**: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 043/95**: Misturas asfálticas a quente – ensaio Marshall; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 053/9**: Misturas betuminosas – percentagem de betume; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 081/98**: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 083/98**: Agregados – análise granulométrica; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 084/95**: Agregado miúdo – determinação da densidade real; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 138/94**: Misturas asfálticas- determinação à tração por compressão diametral; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

Brasil. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM) - **Sumário Mineral**. Brasília, 2012.

Brasil PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS) 2010 versão preliminar para consulta pública, Ministério do Meio Ambiente Brasília disponível em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/253/\\_publicacao/253\\_publicacao02022012041757.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf) acesso em 11/05/2013.

DO, H.S; KEUN,R.S.; MUN, P.H. **A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime**. Science Direct, Waste Management, v. 28, p. 191-199. 2008.

EPPS, J.A.; SEBAALY, P.E.; PENARANDA, J.; MAHER, M.R.; McCANN, M.B.; HAND, A.J **Compatibility of a Test for Moisture-Induced Damage with Superpave Volumetric Mix Design**. NCHRP Report 444. Transportation Research Board, National Research Council, DC, 2000.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **FHWA-RD-97-148**: User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction. Department of Transportation. Washington, 1997.

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.

FROTA, C. A.; ALENCAR, C. L. S., SILVA, C. P. L. Influência do tipo de agregado na qualidade técnica de misturas asfálticas. 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. 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. In: V JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE PAVIMENTOS: POLÍTICAS E TECNOLOGIAS, Recife, 2006. **Anais**. Pernambuco, 2006.

FROTA, C. A.; SILVA C. P. L. Estudo de Misturas Betuminosas com Entulho Reciclado Fracionado E Não-Fracionado. In: 35ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Rio de Janeiro, 2004. **Anais**. Rio de Janeiro, RAPv, 2004. p. 10.

GOUVEIA, L. T. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. Tese de Doutorado, EESC-USP, São Paulo, 2006.

GOUVEIA, L.T.; FERNANDES JR., J.L. **Limitações do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) para Previsão do Comportamento de Misturas Asfálticas**. XVI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Natal, 2002. v.1. p. 157-168.

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, 2005.

HANSEN, T.C. **Recycling of Demolished Concrete and Masonry Report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete**. RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures), Londres, 1992.

HUANG, Y.H. **Pavement Analysis and Design**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.

Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010.

ISAIA, G. C., T. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2º Ed. São Paulo: IBRACON, 2007.

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

KANDHAL, P. S.; Parker Jr., F. **Aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements**. National Cooperative Highway Research Program, p. 405. 1998.

KULAIF, Y. **Análise dos mercados de matérias-primas minerais: estudo de caso da indústria e pedras britadas do estado de SP**. 144 p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

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

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

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

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. 1ª ed., Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1997.

MILLS-BEALE, Julian; YOU, Zhanping. **The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates**. In: Construction and Building Materials. v. 24. p. 230-235. Michigan, Estados Unidos, 2010.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. **A reciclagem de resíduos de construção civil no Brasil: 1986 - 2008**. v. 9. nº 1, p. 57-71, Ambiente Construído, Porto Alegre, 2009.

MOURA, E. **Estudo do Efeito de Aditivos Químicos e da Cal como Melhoradores de Adesividade em Misturas Asfálticas Densas**. Dissertação (Mestrado), POLI/USP, São Paulo, 2001.

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

NATAATMADJA, A.; TAN, Y. L. **Resilient response of recycled concrete road aggregates**. Journal of Transportation Engineering. Reston, v.127, n. 5, p. 450-453. 2001.

NAPA (1982) Mix Design Techniques – Part I. NAPA TAS-14. National Asphalt Pavement Association, Instructors Manual.

SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO (SNV). **Relatório SNV 2013**. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/plano-nacional-de-viacao/snv-2013>. Acesso em: 01/04/2013.

PARANAVITHANA, Sumeda; MOHAJERANI, Abbas. **Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete**. In: Resources, Conservation and Recycling. n. 48. p. 1-12. Melbourne, Austrália, 2006.

PATRIOTA, Marcelo de Barros; MOTTA, Laura Maria Goretti da; FILHO, Ivaldo Dário da Silva Pontes. D. S. P. Efeito da adição de borracha reciclada de pneus pelo

processo seco à mistura asfáltica tipo CBUQ. **Anais**. XVIII ANPET, Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, 2004.

PÉREZ, I.; TOLEDANO, M.; GALLEGU, J.; TAIBO, J. **Asphalt mixtures with construction and demolition debris**, In: *Materiales de Construcción*. vol. 57, 285, p. 17-29. Espanha, 2007.

PÉREZ, I.; TOLEDANO, M.; GALLEGU, J.; TAIBO, J. Asphalt mixtures with construction and demolition debris. **Proc Inst Civil Eng: Trans**, v. 4, n. 163, p. 165–174, 2010.

PÉREZ, I.; PASADÍN, A.R.; MEDINA, L. **Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates**. A Coruna, 2011.

PINTO, T.P.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 199 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. **Manejo e Gestão de Resíduos da Construção Civil**. Como implantar um Sistema de Manejo e Gestão dos Resíduos da Construção Civil nos Municípios. Caixa Econômica Federal; Ministério das Cidades, Ministério do Meio Ambiente. v. 1, 198p, Brasília, 2005.

RAFI, M.M.; QADIR, A.; SIDDIQUI, S.H. **Experimental testing of hot mix asphalt mixture made of recycled aggregates**. *Waste Management*. 12p. 2010.

RIBAS, S. M. **Perfil da indústria de agregados**. Curitiba: MINEROPAR, 1999.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W. **Hotmix asphalt materials, mixture design, and construction**. NAPA Education Foundation, Maryland, 1991.

RON, Marta Baragaño; CASAGRANDE, Michéle Dal Toé; DO VALE, Aline Corales; LOPES, Manuela de Mesquita; SOARES, Jorge Barbosa. Aplicabilidade de Resíduos Reciclados da Construção Civil e Demolição Como Agregados em

Misturas Asfálticas. In: 15ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 19, Salvador, 2008. **Anais**. Salvador, 2008.

LOPES, Manuela de Mesquita; SOARES, Jorge Barbosa. Aplicabilidade de Resíduos Reciclados da Construção Civil e Demolição Como Agregados em Misturas Asfálticas. In: 15ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, Salvador, 2008. **Anais**. Salvador, 2008. p. 9.

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.

SCHUTZBACH, A.M, Case Study of a Full-Depth Asphalt Concrete Inlay, Transportation Research Record, n.1337, p. 42-50. 1992.

SHEN, D. H.; DU, J. C. **Evaluation of building materials recycling on HMA permanent deformation**. Construction and Building Materials, v. 18, n. 6, p. 391–397. 2004.

SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO- SNV 2013. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/plano-nacional-de-viacao/snv-2013>. Acessado em 01/04/2013.

SILVA, Cesar Augusto Rodrigues da Silva. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas**. Dissertação (Mestrado). 194p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas. Ouro Preto, 2009.

SOARES, J.B.; F.A.C. FREITAS; J.V.C. BRANCO e L.M.G. MOTTA. Método de previsão do teor ótimo de ligante em misturas asfálticas tipo CBUQ. 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2000, Brasília. **Anais**. Associação Brasileira de Pavimentação, v. 1, p. 149- 162.

SOLYMAN, M. Klassifizierung von Recycling - Brechsanden und ihre Anwendungen für Beton und für Straßenbaustoffe. Dissertação (Mestrado), 194p. den Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel, Kassel, 2005.

SOUZA, F.V.; SOARES, J.B. **Considerações sobre Módulo Resiliente e Módulo Dinâmico em Misturas Asfálticas com Base na Teoria da Viscoelasticidade.** XII Congresso Ibero-Latino Americano Del Asfalto, Quito, Equador, 2003.

SOARES, J.B.; ALDIGUERI, D.R.; LEITE, L.M. **Relatório de Projeto, Laboratório de Mecânica dos Pavimentos,** Universidade Federal do Ceará e Petrobras, Ceará, 2002.

SOLAMANIAN; M.; HARVEY, J.; TAHMORESSI, M.; TANDON, V. **Test Method to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements.** Topic 3. [http://trb.org/publications/conf/reports/moisture/03\\_TOP3.pdf](http://trb.org/publications/conf/reports/moisture/03_TOP3.pdf), em 28/11/2004

SU, K.; HACHIYA, Y.; MAEKAWA, R. **Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement.** Resources, Conservation & Recycling, v. 54, p. 37-44. 2009.

TOPAL, A., A.U. O, BARADAN B., Use of Recycled Concrete Aggregates in Hot-Mix Asphalt," Eight CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. **Anais.** American Concrete Institute, SP- 235, 2006.

VASCONCELOS, K.L; SOARES, J.B.; LEITE, L.M. (2003) **Influência da Densidade Máxima Teórica na Dosagem de Misturas Asfálticas.** XVII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, v. 1, p. 5-17

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias.** 149p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

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

WEN, H.; BHUSAL, S. **Evaluate Recycled Concrete as Hot Mix Asphalt Aggregate**. Transportation Now, University of Washington, Seattle. 2011.

WONG, Yiik Diew; SUN, Darren Delai; LAI, Dickson. Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt. In: Waste Managent. n. 27. **Anais**. Issue 2. p. 294-301. Singapore, 2007.

WU, S.; QIU, J.; MO, L.; YU, J.; ZHANG, Y.; LI, B. **Investigation of temperature characteristics of recycled hot mix asphalt mixtures**. Resources, Conservation & Recycling, v. 51, p. 610-620. 2007.

ZORDAN, S. E. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

ZHU, Jiqing; Wu, Shaopeng; ZHONG, Jinjun; WANG, Dongming. **Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damage buildings**. In: Construction and Building Materials. v. 29. p.466-475. China, 2011.

YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. (1975) Principle of Pavement Design (2a ed.). John Wiley & Sons, Inc.

## ANEXOS

Leituras e Gráficos do Ensaio de Deformação Permanente de todas as misturas

Ensaio MR AN, A40M50 E A40M100

Ensaio RT- AN, A40M50 E A40M100

Ensaio DUI- AN e A40M100



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação

**t = 60°C**

**Interessado: Adriana Verchai de Lima Lobo**

Nº. Amostra: A NATURAL

**LADO A** Esquerdo

Ciclos: 0

	1	2	3	4	5
A	804	868	917	937	940
B	860	848	918	1030	959
C	995	1161	1250	1231	1172

Ciclos: 100

	1	2	3	4	5
A	849	915	996	985	1005
B	909	875	1000	1089	1022
C	1040	1220	1308	1268	1218

Ciclos: 300

	1	2	3	4	5
A	873	946	1034	1017	1038
B	927	895	1029	1114	1058
C	1069	1237	1330	1291	1240

Ciclos: 1000

	1	2	3	4	5
A	897	986	1083	1049	1072
B	960	922	1062	1155	1112
C	1115	1219	1325	1321	1276

Ciclos: 3000

	1	2	3	4	5
A	940	1029	1136	1084	1113
B	998	962	1112	1102	1149
C	1152	1300	1384	1352	1306

Ciclos: 10000

	1	2	3	4	5
A	995	1084	1192	1143	1165
B	1060	1020	1160	1260	1096
C	1225	1365	1420	1408	1363

Ciclos: 30000

**LADO B** Direit

Ciclos 0

	1	2	3	4	5
A	977	1075	1089	1073	1046
B	1014	993	938	984	1010
C	1159	1127	1089	1110	1084

Ciclos 100

	1	2	3	4	5
A	984	1154	1171	1148	1095
B	987	1038	988	1044	1063
C	1107	1164	1158	1176	1117

Ciclos 300

	1	2	3	4	5
A	1013	1185	1212	1175	1116
B	1018	1066	1010	1075	1078
C	1130	1186	1190	1209	1135

Ciclos 1000

	1	2	3	4	5
A	1037	1219	1246	1207	1147
B	1053	1094	1037	1110	1105
C	1156	1205	1227	1236	1157

Ciclos 3000

	1	2	3	4	5
A	1073	1254	1280	1236	1168
B	1090	1123	1068	1142	1122
C	1185	1233	1264	1274	1183

Ciclos 10000

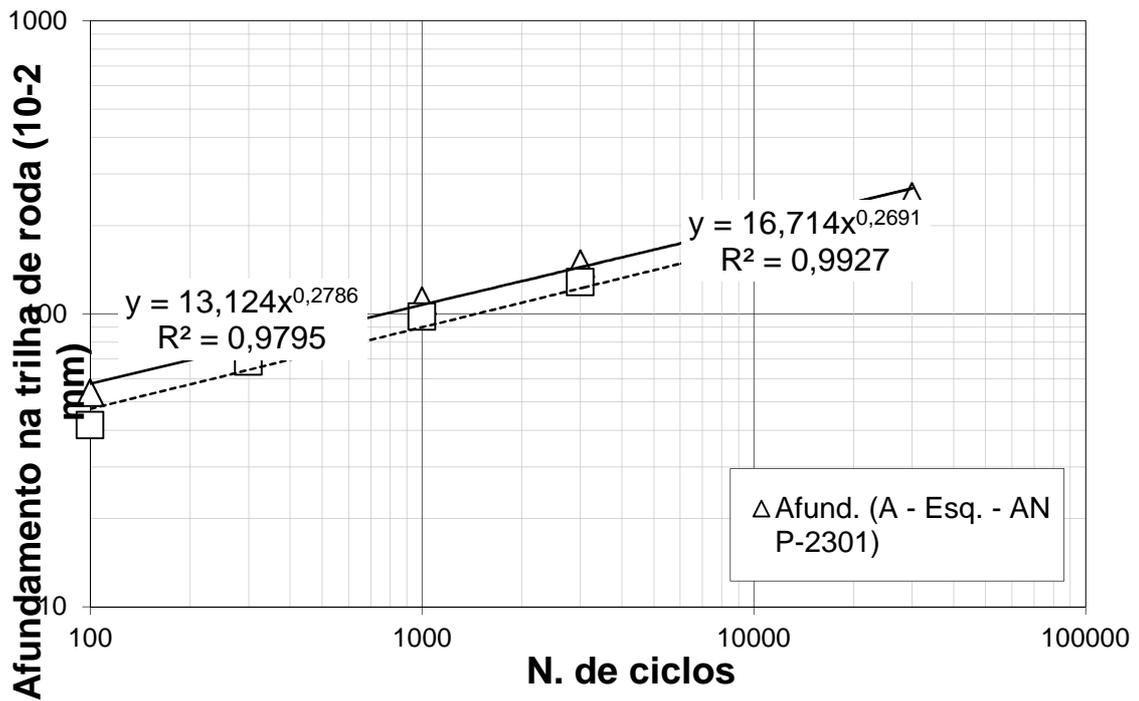
	1	2	3	4	5
A	1114	1315	1329	1282	1210
B	1123	1173	1127	1190	1162
C	1220	1275	1306	1315	1217

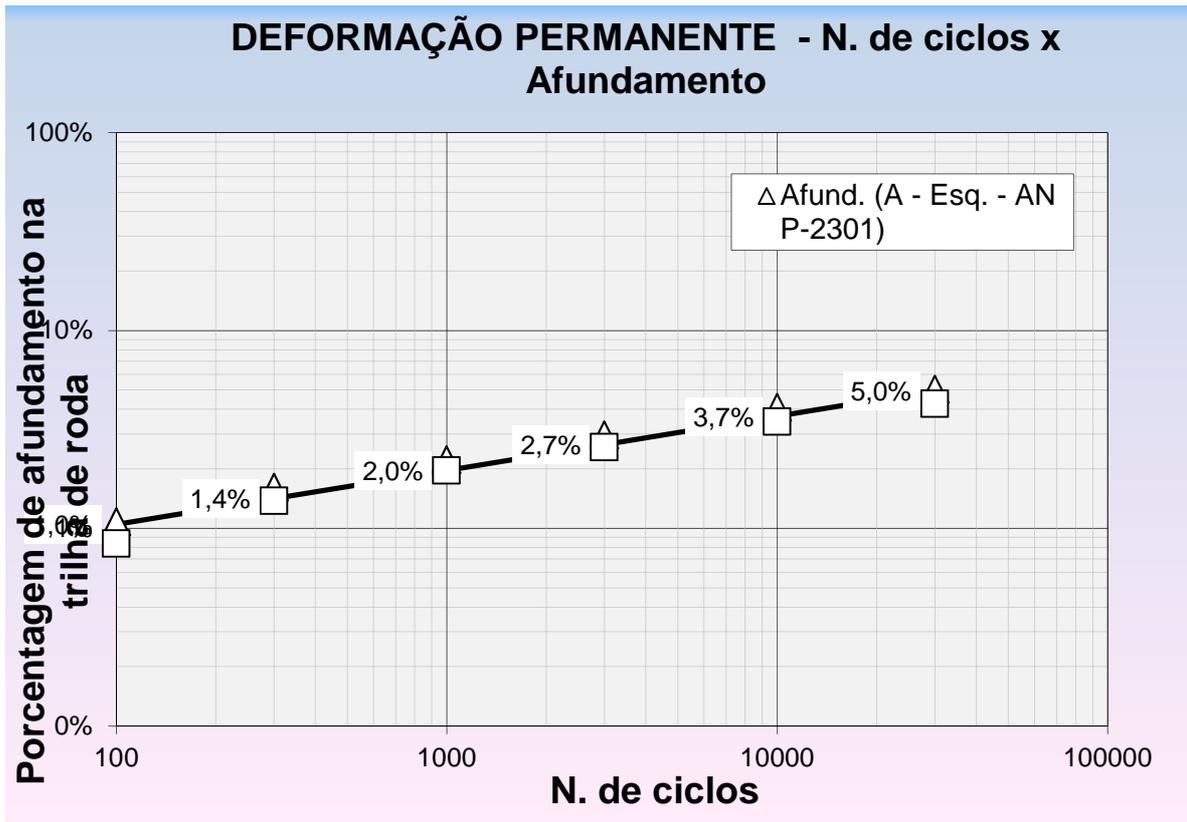
Ciclos: 30000

	1	2	3	4	5
A	1045	1136	1230	1189	1213
B	1118	1062	1218	1310	1247
C	1275	1408	1460	1450	1314

	1	2	3	4	5
A	1162	1365	1370	1327	1250
B	1150	1211	1155	1240	1208
C	1246	1315	1353	1362	1247

### DEFORMAÇÃO PERMANENTE - N. de ciclos x Afundamento







**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação

**t = 60°C**

**Interessado: Adriana Verchai de Lima Lobo**

Nº. Amostra: A20M50

**LADO A** Esquerdo

Ciclos: 0

	1	2	3	4	5
A	1162	1311	1261	1406	1152
B	1092	1182	1200	1297	1179
C	1343	1476	1538	1553	1303

Ciclos: 100

	1	2	3	4	5
A	1214	1377	1351	1423	1224
B	1157	1260	1293	1327	1265
C	1385	1526	1623	1572	1367

Ciclos: 300

	1	2	3	4	5
A	1241	1406	1384	1446	1250
B	1180	1287	1316	1344	1302
C	1407	1544	1644	1592	1391

Ciclos: 1000

	1	2	3	4	5
A	1274	1447	1435	1463	1283
B	1214	1335	1370	1388	1356
C	1433	1569	1664	1612	1327

Ciclos: 3000

	1	2	3	4	5
A	1319	1500	1486	1506	1329
B	1271	1392	1428	1438	1413
C	1472	1608	1710	1650	1480

Ciclos: 10000

	1	2	3	4	5
A	1382	1583	1559	1580	1392
B	1346	1490	1520	1543	1500
C	1535	1674	1765	1720	1548

**LADO B** Direit

Ciclos 0

	1	2	3	4	5
A	1381	1483	1415	1285	1314
B	1248	1442	1343	1209	1143
C	1392	1538	1406	1639	1353

Ciclos 100

	1	2	3	4	5
A	1461	1483	1520	1355	1381
B	1324	1481	1562	1300	1203
C	1431	1562	1482	1705	1378

Ciclos 300

	1	2	3	4	5
A	1486	1535	1539	1388	1410
B	1347	1491	1488	1322	1221
C	1447	1577	1506	1720	1388

Ciclos 1000

	1	2	3	4	5
A	1517	1562	1569	1425	1439
B	1377	1522	1527	1360	1255
C	1455	1591	1523	1728	1402

Ciclos 3000

	1	2	3	4	5
A	1554	1601	1614	1471	1481
B	1424	1566	1575	1402	1295
C	1485	1627	1559	1754	1430

Ciclos 10000

	1	2	3	4	5
A	1595	1653	1662	1531	1534
B	1482	1628	1632	1463	1362
C	1520	1679	1598	1800	1469

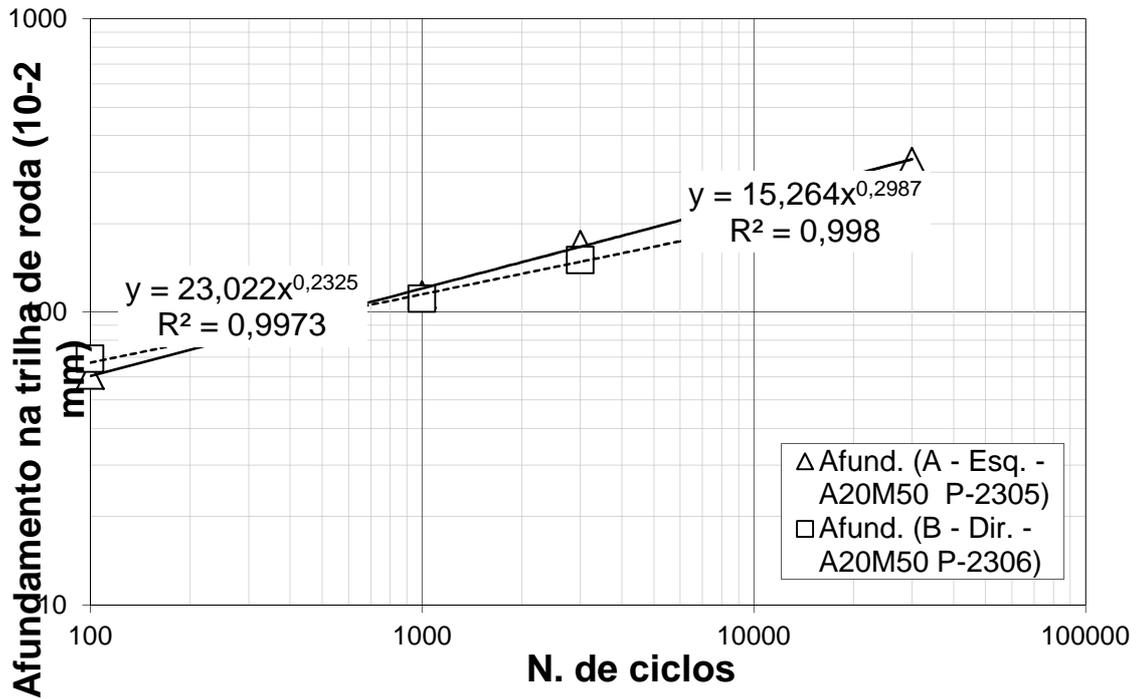
Ciclos: 30000

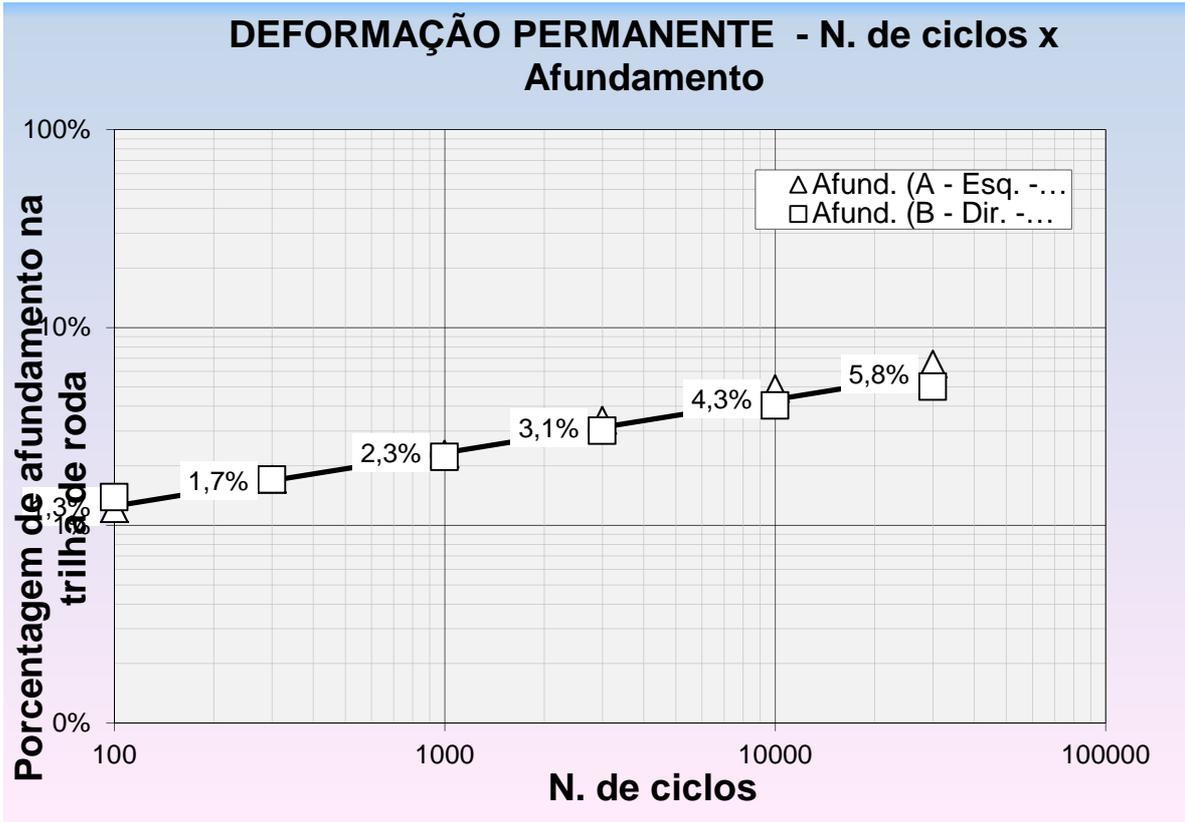
	1	2	3	4	5
A	1454	1763	1650	1644	1470
B	1417	1582	1611	1610	1567
C	1600	1755	1840	1770	1620

Ciclos 30000

	1	2	3	4	5
A	1636	1700	1715	1583	1589
B	1506	1683	1694	1520	1428
C	1563	1720	1638	1850	1528

### DEFORMAÇÃO PERMANENTE - N. de ciclos x Afundamento







**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação

**t = 60°C**

**Interessado: Adriana Verchai de Lima Lobo**

Nº. Amostra: A40M50

**LADO A** Esquerdo

Ciclos: 0

	1	2	3	4	5
A	1291	1423	1440	1421	1360
B	1217	1282	1302	1270	1216
C	1414	1432	1458	1493	1445

Ciclos: 100

	1	2	3	4	5
A	1385	1551	1557	1510	1508
B	1303	1428	1467	1420	1380
C	1515	1566	1592	1624	1559

Ciclos: 300

	1	2	3	4	5
A	1410	1570	1583	1536	1550
B	1330	1448	1503	1467	1432
C	1539	1572	1626	1659	1597

Ciclos: 1000

	1	2	3	4	5
A	1445	1604	1588	1563	1569
B	1360	1545	1540	1488	1465
C	1565	1605	1657	1678	1614

Ciclos: 3000

	1	2	3	4	5
A	1494	1668	1638	1593	1622
B	1401	1519	1702	1530	1527
C	1565	1664	1705	1718	1647

Ciclos: 10000

	1	2	3	4	5
A	1547	1717	1694	1668	1696
B	1472	1608	1680	1614	1595
C	1629	1721	1766	1771	1695

**LADO B** Direit

Ciclos 0

	1	2	3	4	5
A	1188	1300	1357	1464	1473
B	1108	1182	1270	1290	1353
C	1220	1380	1383	1415	1450

Ciclos 100

	1	2	3	4	5
A	1296	1411	1490	1610	1559
B	1227	1300	1417	1426	1476
C	1317	1518	1518	1623	1540

Ciclos 300

	1	2	3	4	5
A	1320	1433	1522	1636	1585
B	1255	1331	1457	1465	1486
C	1343	1541	1555	1650	1566

Ciclos 1000

	1	2	3	4	5
A	1355	1462	1556	1666	1615
B	1292	1368	1506	1500	1534
C	1377	1577	1583	1673	1593

Ciclos 3000

	1	2	3	4	5
A	1391	1502	1600	1705	1656
B	1338	1421	1566	1557	1583
C	1408	1617	1622	1700	1627

Ciclos 10000

	1	2	3	4	5
A	1441	1561	1665	1778	1704
B	1397	1494	1638	1624	1634
C	1453	1673	1681	1747	1671

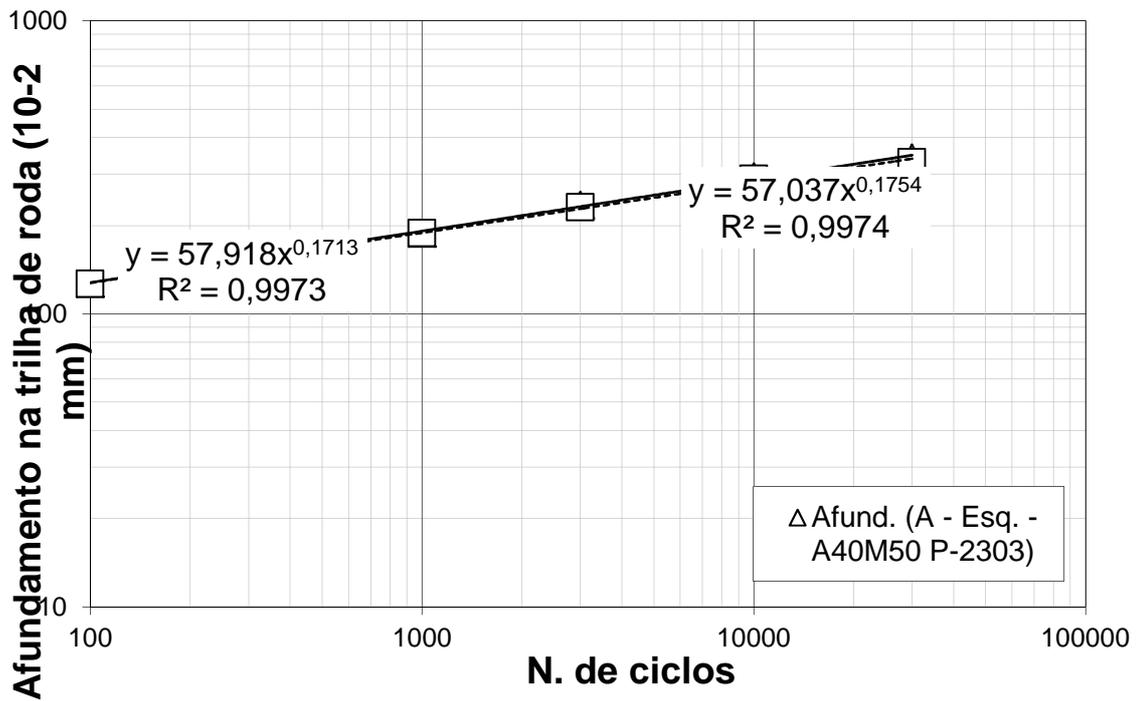
Ciclos: 30000

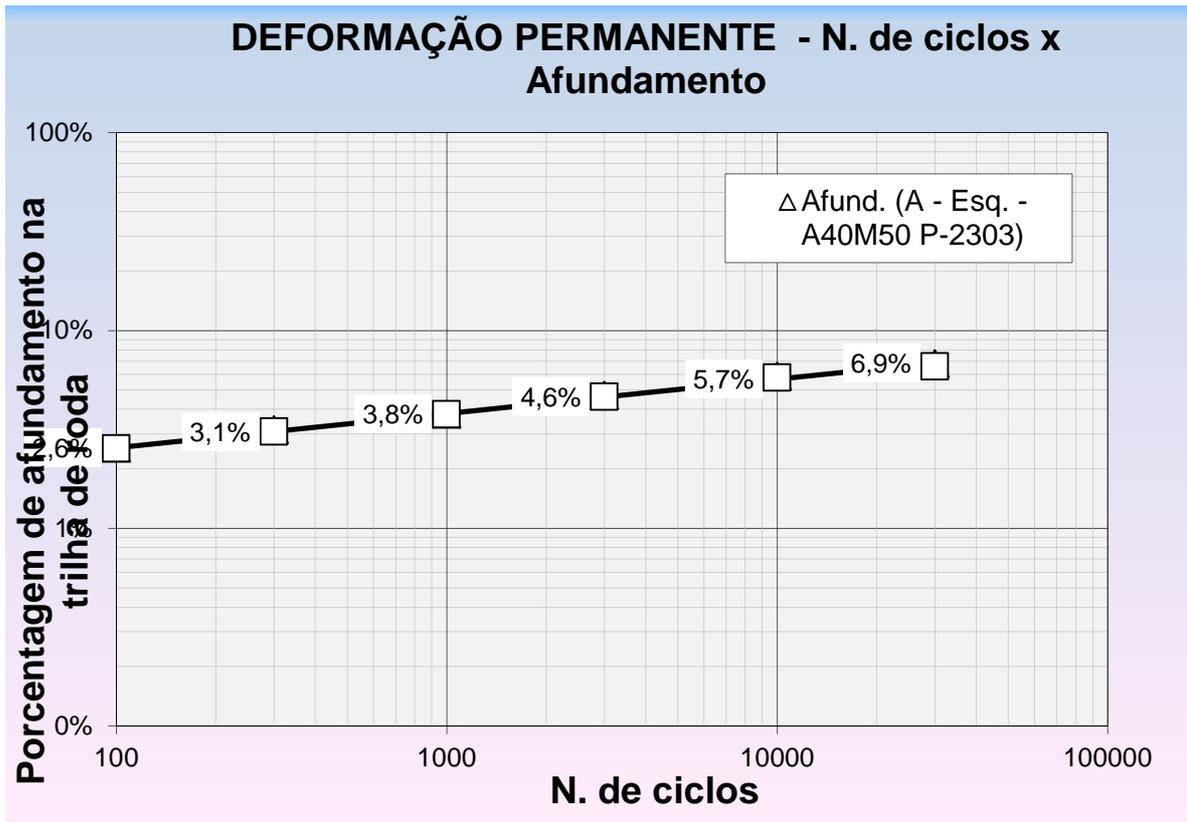
	1	2	3	4	5
A	1585	1749	1728	1702	1738
B	1536	1660	1749	1675	1659
C	1680	1766	1810	1803	1730

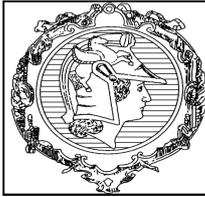
Ciclos 30000

	1	2	3	4	5
A	1476	1597	1701	1816	1736
B	1451	1545	1707	1686	1692
C	1480	1696	1713	1780	1695

### DEFORMAÇÃO PERMANENTE - N. de ciclos x Afundamento







**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação

**t = 60°C**

**Interessado: Adriana Verchai de Lima Lobo**

Nº. Amostra: A20M100

**LADO A** Esquerdo

Ciclos: 0

	1	2	3	4	5
A	1180	1216	1301	1400	1220
B	1047	1142	1179	1206	1146
C	1300	1303	1395	1371	1410

Ciclos: 100

	1	2	3	4	5
A	1231	1289	1362	1451	1276
B	1087	1208	1260	1283	1208
C	1338	1336	1454	1454	1490

Ciclos: 300

	1	2	3	4	5
A	1257	1315	1383	1470	1300
B	1124	1235	1286	1306	1229
C	1352	1353	1476	1476	1539

Ciclos: 1000

	1	2	3	4	5
A	1285	1350	1410	1300	1345
B	1162	1280	1430	1350	1281
C	1393	1382	1528	1515	1576

Ciclos: 3000

	1	2	3	4	5
A	1319	1394	1445	1523	1386
B	1288	1409	1476	1479	1410
C	1427	1409	1575	1550	1600

**LADO B** Direit

Ciclos 0

	1	2	3	4	5
A	1235	1247	1239	1258	1166
B	1032	1260	1260	1186	954
C	1366	1400	1490	1409	1212

Ciclos

: 100

	1	2	3	4	5
A	1346	1348	1342	1352	1249
B	1073	1357	1347	1287	1026
C	1410	1654	1579	1491	1277

Ciclos

: 300

	1	2	3	4	5
A	1373	1384	1415	1388	1283
B	1105	1405	1389	1327	1050
C	1417	1671	1611	1515	1300

Ciclos

: 1000

	1	2	3	4	5
A	1408	1425	1460	1421	1321
B	1146	1450	1450	1331	1099
C	1414	1690	1630	1531	1325

Ciclos

: 3000

	1	2	3	4	5
A	1451	1490	1520	1482	1375
B	1275	1594	1591	1530	1202
C	1507	1725	1705	1582	1361

Ciclos: 10000

	1	2	3	4	5
A	1376	1454	1507	1573	1534
B	1354	1495	1542	1557	1573
C	1469	1454	1648	1615	1768

Ciclos 10000

	1	2	3	4	5
A	1508	1557	1604	1549	1439
B	1334	1668	1683	1618	1292
C	1564	1793	1764	1631	1414

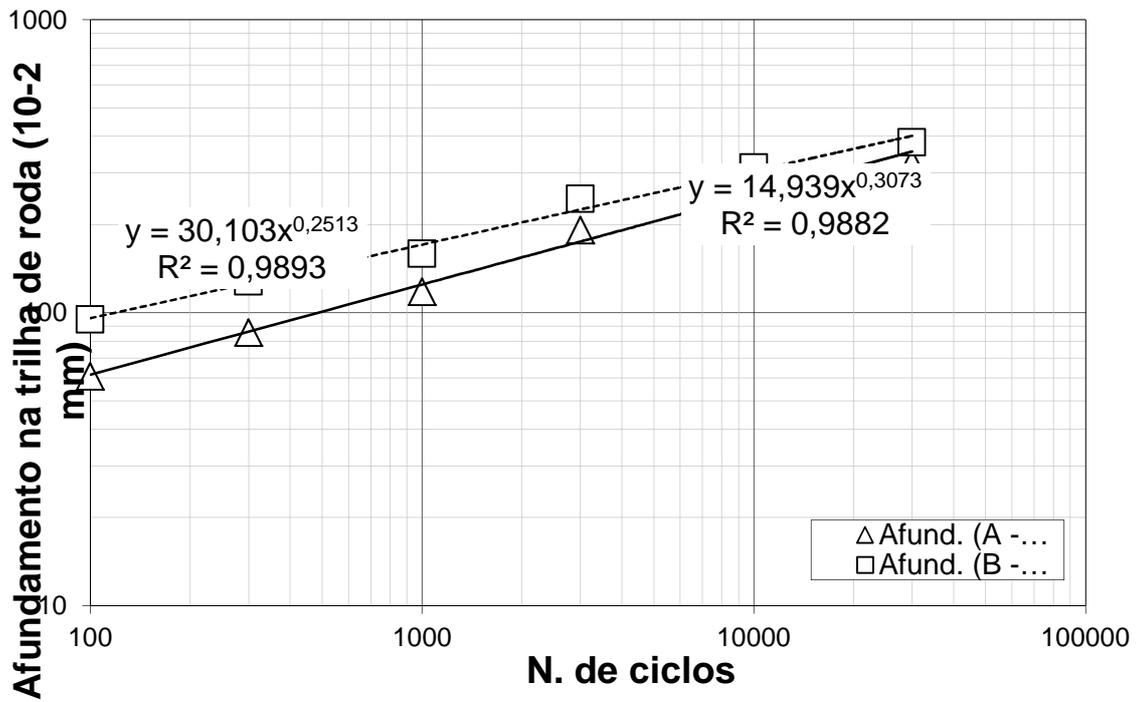
Ciclos: 30000

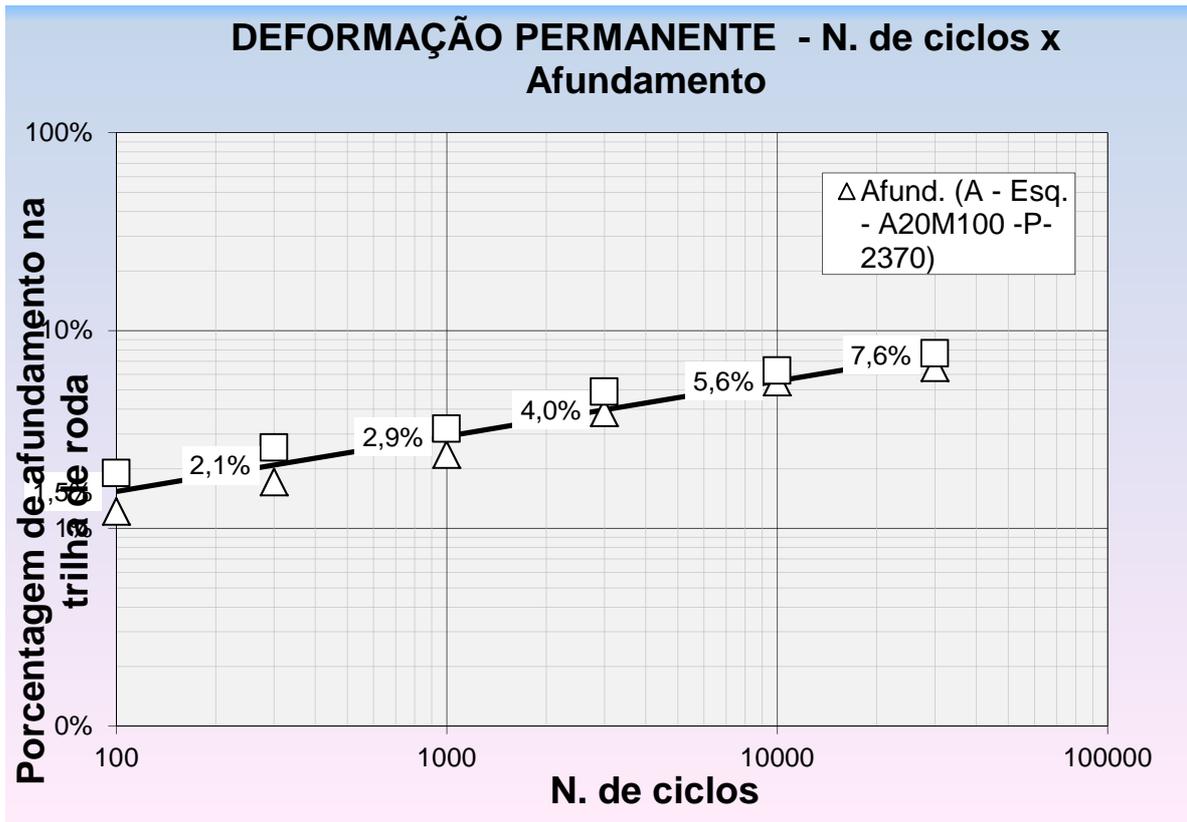
	1	2	3	4	5
A	1436	1510	1573	1633	1555
B	1426	1570	1620	1627	1591
C	1525	1500	1720	1685	1702

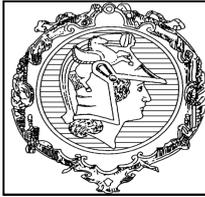
Ciclos 30000

	1	2	3	4	5
A	1575	1640	1676	1622	1502
B	1391	1751	1766	1700	1360
C	1640	1830	1842	1691	1467

### DEFORMAÇÃO PERMANENTE - N. de ciclos x Afundamento







**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação

**t = 60°C**

**Interessado: Adriana Verchai de Lima Lobo**

Nº. Amostra: A40M100

18/03/2011

**LADO A** Esquerdo

Ciclos: 0

	1	2	3	4	5
A	1170	1280	1382	1434	1463
B	1115	1215	1333	1324	1378
C	1227	1340	1421	1529	1623

Ciclos: 100

	1	2	3	4	5
A	1225	1374	1523	1535	1540
B	1187	1332	1432	1448	1482
C	1291	1423	1511	1644	1698

Ciclos: 300

	1	2	3	4	5
A	1245	1393	1550	1562	1560
B	1212	1362	1465	1489	1520
C	1311	1450	1540	1677	1720

Ciclos: 1000

	1	2	3	4	5
A	1275	1420	1572	1586	1586
B	1255	1408	1505	1530	1570
C	1342	1479	1569	1710	1740

Ciclos: 3000

	1	2	3	4	5
A	1316	1467	1609	1623	1624
B	1320	1481	1589	1592	1640
C	1387	1529	1626	1756	1770

Ciclos: 10000

	1	2	3	4	5
A	1384	1545	1678	1696	1682
B	1401	1590	1671	1676	1723
C	1456	1607	1701	1822	1819

**LADO B** Direit

Ciclos 0

	1	2	3	4	5
A	1081	1142	1165	1243	1246
B	1082	1160	1238	1315	1315
C	1333	1405	1480	1504	1559

Ciclos 100

	1	2	3	4	5
A	1156	1217	1255	1337	1341
B	1151	1249	1303	1416	1405
C	1402	1481	1551	1577	1623

Ciclos 300

	1	2	3	4	5
A	1187	1242	1390	1374	1365
B	1171	1289	1332	1456	1431
C	1423	1505	1574	1601	1634

Ciclos 1000

	1	2	3	4	5
A	1229	1281	1339	1428	1408
B	1220	1341	1385	1505	1484
C	1452	1531	1612	1620	1648

Ciclos 3000

	1	2	3	4	5
A	1284	1340	1407	1495	1476
B	1297	1421	1469	1584	1558
C	1495	1570	1666	1656	1674

Ciclos

: 10000

	1	2	3	4	5
A	1358	1435	1509	1537	1582
B	1382	1522	1558	1682	1653
C	1560	1639	1734	1715	1740

Ciclos: 30000

	1	2	3	4	5
A	1447	1613	1741	1756	1738
B	1478	1678	1752	1736	1805
C	1521	1681	1775	1875	1855

Ciclos 30000

	1	2	3	4	5
A	1426	1514	1608	1673	1718
B	1459	1597	1669	1767	1740
C	1614	1706	1805	1775	1796

### DEFORMAÇÃO PERMANENTE - N. de ciclos x Afundamento

