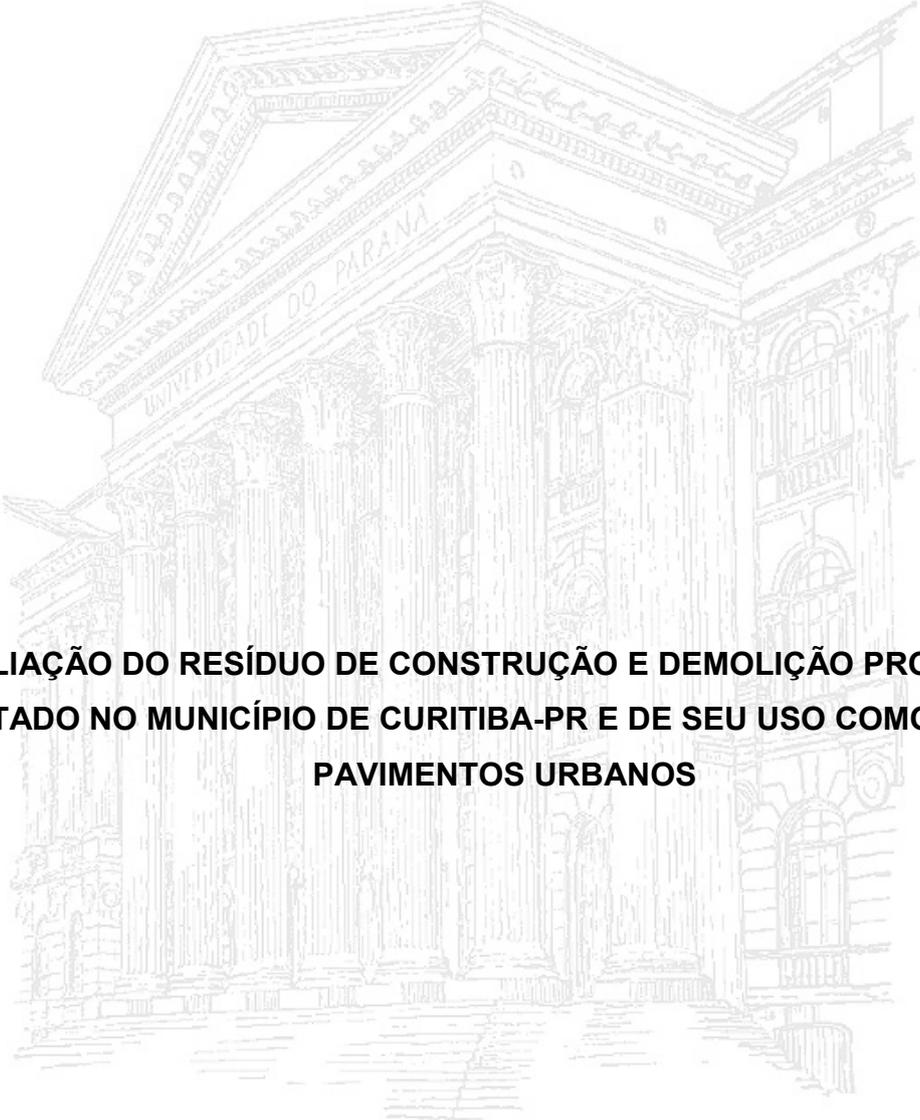


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULO VITOR LUCCA



**AVALIAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PRODUZIDO E
TRATADO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA-PR E DE SEU USO COMO BASE DE
PAVIMENTOS URBANOS**

CURITIBA

2017

PAULO VITOR LUCCA

**AVALIAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PRODUZIDO E
TRATADO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA-PR E DE SEU USO COMO BASE DE
PAVIMENTOS URBANOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial, no curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Luiz Mathias

Coorientador: Prof. Dr. Klaus Martin Fischer

CURITIBA

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

L934a

Lucca, Paulo Vitor

Avaliação do resíduo de construção e demolição produzido e tratado no município de Curitiba-PR e de seu uso como base de pavimentos urbanos / Paulo Vitor Lucca. – Curitiba, 2017.
149 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, 2017.

Orientador: Alvaro Luiz Mathias.

Coorientador: Klaus Martin Fischer.

1. Planejamento ambiental. 2. Poluição. 3. Reciclagem. 4. Agregado reciclado. 5. Pavimentação.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Mathias, Alvaro Luiz. III. Fischer, Klaus Martin. IV. Título.

CDD: 628.4



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **PAULO VITOR LUCCA** intitulada: **AVALIAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PRODUZIDO E TRATADO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA-PR E DE SEU USO COMO BASE DE PAVIMENTOS URBANOS**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 17 de Outubro de 2017.

ALVARO LUIZ MATHIAS

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

ADAUTO JOSÉ MIRANDA DE LIMA

Avaliador Externo (UTFPR)

REGINA WEINSCHUTZ

Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Aos meus pais, Jair e Marizete, pelo apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alvaro Luiz Mathias, pelo acompanhamento e compartilhamento de todo o conhecimento.

Aos amigos que fiz durante o mestrado, em especial Ana Paula e Manuelle pelo apoio.

Aos amigos que me acompanham em todos os momentos da vida.

A Prefeitura Municipal de Curitiba por autorizar e fornecer subsídios para a realização da pesquisa.

Aos profissionais dos Laboratórios da Secretária Municipal de Obras de Curitiba e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Aos Engenheiros e Arquitetos da Prefeitura Municipal de Curitiba que auxiliaram com sua experiência.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial e seus parceiros (UFPR, SENAI e Universidade de Stuttgart) que por meio dos seus profissionais promovem a disseminação do conhecimento.

Aos Professores Doutores Aduino José Miranda de Lima, Bruno Rafael Vieira, Monica Beatriz Kolicheski e Regina Weinschutz pelas contribuições e sugestões ao estudo.

RESUMO

A construção civil demanda parte significativa dos insumos naturais, da energia global e gera 50% ou mais dos resíduos sólidos urbanos. Os resíduos da construção e demolição (RCD) são predominantemente não perigosos e inertes, tendo sido essencialmente destinados para aterros sanitários na região metropolitana de Curitiba. Seu tratamento pode gerar o agregado reciclado de concreto (ARC), no mínimo 90% em massa de fragmentos cimentícios e rochas, ou misto (ARM), predominantemente materiais cerâmicos que podem ser usados como camadas de pavimentos. O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade do uso de RCD em pavimentos. A aplicação de ARC em ensaio preliminar de campo foi adequada para reforço de base, construção de ciclovia e manutenção de revestimento primário (saibro) desde que se respeite a umidade e a compactação adequada. Três empresas de reciclagem de RCD foram identificadas, sendo que duas forneceram agregados reciclados para os estudos subsequentes. A caracterização laboratorial, segundo as normas internas da Prefeitura Municipal de Curitiba, revelou que a empresa A fornece ARC classificada como brita graduada aplicável em bases de pavimentos, e a B fornece ARM, classificada como brita 4A, aplicável como sub-base. Dois lotes de ARM foram fornecidos, contudo o primeiro foi reprovado pela grande quantidade de contaminantes. O lote de ARC e o segundo lote de ARM atenderam aos requisitos das normas pertinentes. O efeito da umidade e do grau de compactação (golpes) sobre o CBR é relevante de modo linear e quadrático, bem como sua interação secundária. Apesar da dificuldade de repetibilidade experimental geralmente observada para os agregados reciclados, o modelo de superfície gerada apresentou boa previsibilidade e a condição ótima demanda energia de 47 golpes e umidade de 10,1%. A expansão não apresentou bom ajuste. Dois trechos de campo com umidade e compactação pré-definidos foram realizados com ARC e com Agregado Natural. Não foi realizado com ARM devido a sua indisponibilidade. Não foi perceptível diferença entre os trechos produzidos com ARC ou com agregado natural. Assim, pode haver uma economia de 13,2% quando se utiliza o ARC, com base nos valores atuais de mercado. Nesse sentido, seria possível construir 31,29 km de vias urbanas resultando em uma economia de R\$ 3.030.058,64, com base em 70% da geração média de 166.546,96 ton/ano de RCD de Classe A (cimentício, cerâmico e rocha). Esse cálculo presume a mesma condição de construção observada no trecho com ARC, mesmo tráfego e condição de solo. Além do mais, diminui o impacto ambiental de extração de mais rochas para produção de agregados. Já o RCD misturado inviabiliza economicamente a produção de agregados reciclados e sua destinação para aterro é mais vantajosa economicamente, o que amplia o dano ambiental. Neste sentido, há a demanda urgente pela implantação de ação preventiva de sua seleção na obra, transporte e processamento.

Palavras-chave: Planejamento ambiental. Minimização de poluição. Reciclagem. Agregado reciclado. Pavimentação.

ABSTRACT

Civil construction requires a significant part of natural resources including global energy, and it generates up to 50% of solid urban waste. Construction and demolition wastes (CDW's) are predominantly inert and non-hazardous, intending primarily in sanitary landfills located in the metropolitan area of Curitiba. Its treatment can generate the Recycled Concrete Aggregate (RCA), and at least 90% is cement and rock fragments, or even mixed (RMA), predominantly ceramic materials that can be used as pavement layers. The objective of this study was to evaluate the feasibility of the use of CDW in pavements. The application of RCA in preliminary field testing was adequate for reinforcement basis, cycling lane construction and primary coating maintenance (gravel), once provided adequate moisture and compaction. Three CDW recycling companies were identified, two of which provided recycled aggregates for subsequent studies. The laboratory characterization, according to the internal regulations of the City of Curitiba, revealed that company A provides RCA, classified as grade gravel applicable to pavement basis, and company B provides RMA, classified as 4A grit, applicable as a sub-base. Two batches of RMA were supplied, and the first was rejected for the large amount of contaminants. The RCA lot and the second RMA lot have reached the requirements of the pattern. The effect of moisture and the degree of compaction (strokes) on the CBR is relevant in a linear and quadratic way, as well as its secondary interaction. Despite the difficulty of experimental repeatability generally observed for recycled aggregates, the generated surface model presented good predictability, and the optimal condition requires energy of 47 strokes and humidity of 10.1%. The expansion did not present a good settlement. Two sections applied in field with pre-defined moisture and compaction were performed with RCA or with Natural Aggregate. It was not performed with RMA due to its unavailability. There was no remarkable difference between the sections produced with RCA and with natural aggregate. Thus, there can be a saving of 13.2% when using RCA. Furthermore, it would be possible to build 31.29 km of urban roads resulting in an economy of R\$ 3,030,058.64 (Brazilian Reais), based on 70% of the average generation of 166,546.96 tons/year of Class A CDW (cement, ceramic and rock). This calculation assumes the same construction condition observed in the RCA stretch; even traffic and soil condition. Beyond that, it reduces the environmental impact of extracting more rocks for aggregate production. On the other hand, the mixed CDW makes impracticable the production of recycled aggregates but its destination in landfill is economically viable, which increases the environmental damage. In this sense, there is the urgent demand for the implementation of preventive action of its selection, transportation and processing.

Key-words: Environmental planning. Minimization of pollution. Recycling. Recycled aggregate. Paving.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CAMADAS TÍPICAS DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO	19
FIGURA 2 – USINAS FIXAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	32
FIGURA 3 – AGREGADO RECICLADO SENDO UTILIZADO EM BASE DE PAVIMENTO	33
FIGURA 4 – EXEMPLO DE CURVA DE COMPACTAÇÃO PARA DETERMINADA ENERGIA	44
FIGURA 5 – PRENSAS UTILIZADAS PARA LEITURA DO CBR	45
FIGURA 6 – PAVIMENTO FLEXÍVEL(a), DE BASE SEMIRRÍGIDA(b) E RÍGIDO(c) 47	
FIGURA 7 – COMPOSIÇÃO TÍPICA DAS CAMADAS DE UM PAVIMENTO	47
FIGURA 8 – TIPOS DE BASES E SUB-BASES E SUAS COMPOSIÇÕES	48
FIGURA 9 – OCORRÊNCIA DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA (BORRACHUDO) NO PAVIMENTO	52
FIGURA 10 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DO CBR E EXPANSÃO.....	62
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO DAS ESPESSURAS DAS CAMADAS DE UM PAVIMENTO DIMENSIONADO PELO MÉTODO DO EXTINTO DNER 65	
FIGURA 12 –PRODUÇÃO DE ARM – EMPRESA B	69
FIGURA 13 – UTILIZAÇÃO DE ARC COMO REFORÇO DE BASE EM CURITIBA-PR	72
FIGURA 14 – UTILIZAÇÃO DE ARC COMO BASE DE COMPLEMENTO DE PAVIMENTO EM CURITIBA-PR.....	73
FIGURA 15 – RECUPERAÇÃO DO PAVIMENTO DA RUA ANGELO MORO	74
FIGURA 16 – ADERÊNCIA ENTRE A EMULSÃO E A BASE DE AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO DANIFICADA DEVIDO À BAIXA UMIDADE (a) (b) E UMEDECIMENTO DA BASE ANTES DA APLICAÇÃO DA EMULSÃO (c)	75
FIGURA 17 – ANTES (a) E DEPOIS (b) DE CONSTRUÇÃO DE CICLOVIA COM BASE DE ARC	76

FIGURA 18 – SEQUÊNCIA DA EXECUÇÃO DO TRECHO DE TSD COM BRITA GRADUADA RECICLADA DE CONCRETO	77
FIGURA 19 – DESGASTE APRESENTADO NO TRECHO DE BRITA GRADUADA RECICLADA DE CONCRETO	78
FIGURA 20 – VIA DE REVESTIMENTO PRIMÁRIO ANTES (a) E DURANTE A APLICAÇÃO DE SAIBRO RECICLADO DE CONCRETO (b).....	79
FIGURA 21 – TRECHO EXECUTADO COM AGREGADO RECICLADO APÓS 47 DIAS DA EXECUÇÃO.....	79
FIGURA 22 – DIFERENÇA GRANULOMÉTRICA ENTRE SAIBRO RECICLADO DE CONCRETO (a) E BRITA GRADUADA RECICLADA DE CONCRETO (b).....	79
FIGURA 23 – MATERIAL PARA ENSAIO DE ARC (a) E ARM – 1º LOTE (b).....	81
FIGURA 24 – COMPOSIÇÃO DE ARC (MÉDIA).....	81
FIGURA 25 – ASPECTO DO AGREGADO RECICLADO MISTO FORNECIDO PELA EMPRESA B	82
FIGURA 26 – MATERIAIS NÃO MINERAIS E TORRÕES DE ARGILA	82
FIGURA 27 – COMPOSIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO MISTO – ARM – LOTE 01 (MÉDIA)	83
FIGURA 28 – SEGUNDO LOTE DE AGREGADO RECICLADO MISTO (ARM)	83
FIGURA 29 – COMPOSIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO MISTO – ARM – LOTE 02 (MÉDIA)	84
FIGURA 30 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS – ARC	85
FIGURA 31 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS - ARM.....	86
FIGURA 32 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE ÍNDICE DE FORMA – ARC	88
FIGURA 33 – COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA (a) e MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA (b) – ARC.....	91
FIGURA 34 – CURVA DE COMPACTAÇÃO – ARC.....	92
FIGURA 35 – CURVA DE COMPACTAÇÃO – ARM	93
FIGURA 36 – EFEITO UNIVARIADO DA UMIDADE SOBRE A EXPANSÃO E O CBR - ARC.....	96
FIGURA 37 – PONTOS DO EXPERIMENTO TIPO ESTRELA – ARC	97
FIGURA 38 – GRÁFICO DE PARETO DA INFLUÊNCIA DA ENERGIA (E) E UMIDADE SOBRE O CBR.....	99

FIGURA 39 - EFEITO DA ENERGIA (E) E DA UMIDADE (U) SOBRE O CBR - ARC	
100	
FIGURA 40 – PREVISÃO DO CBR EM RELAÇÃO AOS DADOS LABORATORIAIS -	
ARC.....	100
FIGURA 41 – RESÍDUOS – CBR – ARC	101
FIGURA 42 – GRÁFICO DE PARETO DA INFLUÊNCIA DA ENERGIA (E) E	
UMIDADE (U) SOBRE A EXPANSÃO	102
FIGURA 43 – PREVISÃO DA EXPANSÃO EM RELAÇÃO AOS DADOS	
LABORATORIAIS - ARC.....	102
FIGURA 44 – EFEITO DA ENERGIA (E) E DA UMIDADE SOBRE O CBR - ARC.	103
FIGURA 45 – ESTABILIDADE DO CORPO DE PROVA COM UMIDADE PRÓXIMA	
DA ÓTIMA (a) E COM UMIDADE ELEVADA (b) - ARC.....	103
FIGURA 46 – ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA PARA MEDIÇÃO DO CBR	
– ARC (a) E EXEMPLO DE PEDREGULHO LOCALIZADO SOB A	
ÁREA DE INFLUÊNCIA DO PISTÃO DE ROMPIMENTO DO CBR –	
ARC (b)	104
FIGURA 47 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE CBR COM PENETRÔMETRO SUL	
AFRICANO (a) NA RUA CIDADE DE OURO – CURITIBA (PR) (b) ..	105
FIGURA 48 – CONFIGURAÇÃO DE UM TRECHO EXPERIMENTAL.	106
FIGURA 49 – ESCAVAÇÃO (a) E COMPACTAÇÃO DO SUBLEITO (b) – TRECHO	
01	107
FIGURA 50 – SUB-BASE DE ARC: ESPALHAMENTO (a) E TRECHO	
COMPACTADO (b)	107
FIGURA 51 – BASE DE ARC COMPACTADA.....	108
FIGURA 52 – IMPRIMAÇÃO (a) E APLICAÇÃO DO CBUQ (b) – TRECHO 01.....	108
FIGURA 53 – SEQUÊNCIA DA EXECUÇÃO DO TRECHO 02	110
FIGURA 54 – MEDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA ANTES DA EXECUÇÃO DOS	
TRECHOS.....	111
FIGURA 55 - AMOSTRA DE CARGA RECEBIDA PARA ESTUDO DA	
COMPOSIÇÃO DOS ENTULHOS NA CIDADE DE CURITIBA	114
FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DE CUSTOS PARA DESTINAÇÃO PARA ATERRO X	
RECICLAGEM	118

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – INSTRUMENTOS LEGAIS E NORMATIVOS DE POLÍTICAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE ABRANGÊNCIA NACIONAL	27
QUADRO 2 – NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS NA ÁREA DE RESÍDUOS SÓLIDOS	27
QUADRO 3 – GERAÇÃO DE RCD EM CANTEIROS DE OBRA - BRASIL	30
QUADRO 4 – COMPOSIÇÃO DO RCD, EM % DE MASSA, SEGUNDO DIVERSOS ESTUDOS.....	31
QUADRO 5 – FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DE BASES SEGUNDO O DNIT	37
QUADRO 6 - FAIXA GRANULOMÉTRICA BRITA 4-A	38
QUADRO 7 – ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO	43
QUADRO 8 – RESUMO DOS REQUISITOS DA NBR n° 15.116/2004 EM FUNÇÃO DA CAMADA DO PAVIMENTO	45
QUADRO 9 – TIPOS DE PAVIMENTO.....	47
QUADRO 10 - NOMENCLATURA DOS MATERIAIS UTILIZADOS COMO BASE E SUB-BASE DE ACORDO COM O TERMO DE REFERÊNCIA DA PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA	49
QUADRO 11 – TIPOS DE AGREGADOS RECICLADOS ESTUDADOS	57
QUADRO 12 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DE ACORDO COM AS NORMAS PARA AVALIAR AS DIVERSAS PROPRIEDADES.....	58
QUADRO 13 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DOS AGREGADOS DE ACORDO COM AS RESPECTIVAS NORMAS	59
QUADRO 14 – REQUISITOS DOS MATERIAIS PARA EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO COM BASE NAS ORIENTAÇÕES DO MÉTODO DNER.....	64
QUADRO 15 – CONFIGURAÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS	66
QUADRO 16 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A CONSTRUÇÃO DO TRECHO	66
QUADRO 17 – PERÍODOS DE VERIFICAÇÃO DA BACIA DE DEFORMAÇÃO DO PAVIMENTO	67
QUADRO 18 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL	68

QUADRO 19 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA - ARC.....	91
QUADRO 20 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA - ARM	92
QUADRO 21 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, CBR E EXPANSÃO.....	94
QUADRO 22 – DADOS DOS TRECHOS 01 E 02	106
QUADRO 23 – CONVERSÃO DOS VALORES GERADOS DE RCD EM CURITIBA-PR EM QUILOMETROS DE VIAS	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – GERAÇÃO TOTAL, REAPROVEITAMENTO E GERAÇÃO PER CAPITA DE RCD NO BRASIL E NO MUNDO	29
TABELA 2 – EFEITO DA ENERGIA E UMIDADE SOBRE A EXPANSÃO E CBR ...	63
TABELA 3 – CUSTOS DE AGREGADOS RECICLADOS (POSTO OBRA)	70
TABELA 4 – EMPREGO DE AGREGADOS RECICLADOS COMO BASE DE PAVIMENTOS EM TRECHOS DE AVALIAÇÃO PRELIMINAR.....	71
TABELA 5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA – ARC	85
TABELA 6 – RESUMO DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA - ARM	86
TABELA 7 – PARÂMETROS DE ANÁLISE DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS – ARC E ARM	87
TABELA 8 – EQUIVALENTE DE AREIA.....	88
TABELA 9 – RESULTADOS DO ÍNDICE DE ABRASÃO LOS ANGELES.....	90
TABELA 10 – RESULTADOS DE CBR E EXPANSÃO – ARC E ARM	95
TABELA 11 – CONDIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA O PLANEJAMENTO EM ESTRELA COM PONTO CENTRAL	97
TABELA 12 – EFEITO DA ENERGIA E UMIDADE SOBRE A EXPANSÃO E CBR	98
TABELA 13 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS EFEITOS INDIVIDUAIS E DA INTERAÇÃO LINEAR DA UMIDADE (U) E DA ENERGIA (E) NO CBR 98	
TABELA 14 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS EFEITOS INDIVIDUAIS E DA INTERAÇÃO LINEAR DA UMIDADE (U) E DA ENERGIA (E) NA EXPANSÃO	101
TABELA 15 – MEDIÇÕES DEFLECTOMÉTRICAS - RESUMO	112
TABELA 16 – AMOSTRAS ANALISADAS DE RCD COLETADAS PELA PREFEITURA DE CURITIBA.....	114
TABELA 17 – TOTAL DE ENTULHOS COLETADOS PELA PMC 2013 – SET 2017 E ESTIMATIVA DE RESÍDUOS CLASSE A.....	115
TABELA 18 – RESÍDUOS GERADOS NOS CANTEIROS DE OBRA DA REGIÃO DE CURITIBA-PR	116
TABELA 19 – VALORES PARA RECEBIMENTO DE MATERIAIS – EMPRESA B117	

LISTA DE SIGLAS

AASHO	-	<i>American Association of State Highway Officials</i>
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	-	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ABRELPE	-	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACERTAR	-	Associação dos Transportadores de Resíduos de Curitiba e Região
ANOVA	-	Análise de Variância
ARC	-	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	-	Agregado Reciclado Misto
B4RM	-	Brita 4A Reciclada Mista
BGRC	-	Brita Graduada Reciclada de Concreto
CAP	-	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	-	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	-	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	-	Confederação Nacional de Transportes
CONAMA	-	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DCP	-	<i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
DMC	-	Dimensão Máxima Característica
DMUBN	-	Distrito de Manutenção Urbana do Bairro Novo
DMUPN	-	Distrito de Manutenção Urbana do Pinheirinho
DNER	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EC	-	<i>European Commission</i>
EPA	-	<i>Environmental Protection Agency</i>
ES	-	Especificação de Serviço
HRB	-	<i>Highway Research Board</i>
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	-	Instrução de Projeto
IPEA	-	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

ISC	- Índice de Suporte Califórnia
ME	- Método de Ensaio
NBR	- Norma Brasileira
PMC	- Prefeitura Municipal de Curitiba
PMSP	- Prefeitura Municipal de São Paulo
PNRS	- Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	- Resíduos da Construção Civil
RCD	- Resíduos de Construção e Demolição
RM	- Ruptura Média
RR	- Ruptura Rápida
RSU	- Resíduos Sólidos Urbanos
SENAI-PR	- Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - Paraná
SINDUSCON-PR	- Sindicato da Industria da Construção Civil - Paraná
SMMA	- Secretaria Municipal do Meio Ambiente
SMOP	- Secretaria Municipal de Obras Públicas
TSB	- Tratamento Superficial Betuminoso
TSD	- Tratamento Superficial Duplo
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UTFPR	- Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE ABREVIATURAS

kN	-	Quilo Newton
m ³	-	Metros cúbicos
m ²	-	Metros quadrados
m	-	Metro(s)
cm	-	Centímetros
ton. ou t	-	Toneladas
kg	-	Quilo
km	-	Quilômetro
N	-	Newton
tf	-	Tonelada força
W _{ótima}	-	Umidade ótima
H _{eq}	-	Espessura do total pavimento
H ₂₀	-	Espessura sobre a camada de sub-base
H _n	-	Espessura sobre a camada de subleito
K _R	-	Coefficiente estrutural do revestimento
K _B	-	Coefficiente estrutural da base
K _S	-	Coefficiente estrutural da sub-base
K _{Ref}	-	Coefficiente estrutura do reforço do subleito
h _n	-	Espessura da camada de reforço do subleito
h ₂₀	-	Espessura da camada de sub-base
B	-	Espessura da camada de base
R	-	Espessura da camada de revestimento
D _{adm}	-	Deflexão admissível
D _p	-	Deflexão de projeto
e	-	Espessura
E	-	Energia (número de golpes)
U	-	Umidade
Q	-	Ordem quadrática
L	-	Ordem linear
R ²	-	Coefficiente de determinação
GC	-	Grau de Compactação

ALA	-	Abrasão Los Angeles
DP	-	Desvio padrão
SS	-	Soma dos quadrados
df	-	Grau de liberdade
MS	-	Quadrados médios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	24
2.1	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	24
2.2	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA	25
2.3	GERAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL E NO MUNDO.....	28
2.4	USINAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	31
2.5	POSSÍVEIS USOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – CLASSE A	33
2.5.1	Estudos de uso de resíduos da construção civil em pavimentação no Brasil .	34
2.6	PARÂMETROS DE ANÁLISE DE AGREGADOS RECICLADOS	35
2.6.1	Composição e Caracterização dos agregados reciclados	36
2.6.2	Resistência mecânica.....	42
2.7	PAVIMENTO URBANO	46
2.7.1	Materiais empregados em base de pavimentos	48
2.7.2	Dimensionamento de pavimentos.....	49
2.7.2.1	Método do extinto DNER.....	50
2.7.2.2	Método da Prefeitura Municipal de São Paulo	50
2.7.3	Tratamento superficial betuminoso (TSB).....	51
2.7.4	Manutenção de pavimentos urbanos.....	51
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.2	AVALIAÇÃO PRELIMINAR DOS AGREGADOS RECICLADOS EM PAVIMENTOS	53
3.3	CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DOS AGREGADOS RECICLADOS .	57
3.3.1	Caracterização geral.....	57
3.3.2	Ensaio mecânicos e de estabilidade	58

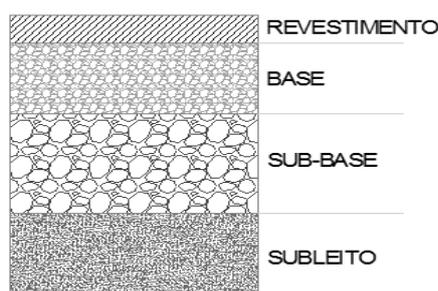
3.4	CONSTRUÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS.....	63
3.5	ANÁLISE DE CUSTOS E GANHOS AMBIENTAIS	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.2	AVALIAÇÃO PRELIMINAR DOS AGREGADOS RECICLADOS EM MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS.....	70
4.3	AVALIAÇÃO LABORATORIAL DOS AGREGADOS RECICLADOS	80
4.3.1	Caracterização dos agregados reciclados	80
4.3.2	Ensaio mecânicos e de estabilidade	89
4.3.3	Planejamento do composto central.....	96
4.4	AVALIAÇÃO EM CAMPO DOS AGREGADOS RECICLADOS	104
4.4.1	Características da via	104
4.4.2	Dimensionamento do pavimento	105
4.4.3	Execução dos trechos.....	106
4.4.4	Medições Deflectométricas do pavimento	111
4.5	CUSTOS E GANHOS AMBIENTAIS	112
5	CONCLUSÕES	119
	REFERÊNCIAS.....	122
	APÊNDICE 01 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE CARACTERIZAÇÃO	131
	APÊNDICE 02 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE COMPACTAÇÃO, INDÍCE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC ou CBR) E EXPANSÃO	137
	APÊNDICE 03 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE INDÍCE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC ou CBR) E EXPANSÃO PARA O EXPERIMENTO DE COMPOSTO CENTRAL	142
	APÊNDICE 04 – INDICE CBR DO SUBLEITO DA RUA CIDADE DE OURO.....	144
	APÊNDICE 05 – LEITURAS DA VIGA BENKELMAN	145
	APÊNDICE 06 – COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS.....	148

1 INTRODUÇÃO

A geração e descarte de resíduos sólidos pelas atividades da construção civil causam deletérios impactos ambientais de diversas ordens. Segundo Oikonomou (2005), os materiais de construção civil são essenciais para a vida humana, pois passa-se cerca de 90% do tempo nessas infraestruturas. Em se tratando do meio ambiente, a construção civil consome cerca de 50% das matérias-primas, cerca de 40% da energia e é responsável por 50% dos resíduos sólidos gerados. Segundo Pinto (1999), os resíduos da construção e demolição (RCD) representam cerca de 40 a 70% da massa total de resíduos sólidos gerados nas cidades de médio e grande porte no Brasil.

Nesse contexto, este estudo avaliou o potencial de uso de RCD em obras de infraestrutura urbana, mais especificamente para as camadas intermediárias que compõe os pavimentos das cidades (base, sub-base e reforço do subleito; Figura 1). Isso ocorreu devido à crescente demanda por este tipo de infraestrutura, por limitação de recursos naturais e pela necessidade de destinação adequada, que devido aos altos custos acabam promovendo a destinação irregular destes resíduos. Desta forma, o RCD pode ser classificado, tratado e fracionado em classes para viabilizar sua aplicação em pavimentos.

FIGURA 1 – CAMADAS TÍPICAS DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO



FONTE: O Autor (2016)

Segundo Angulo (2000), a variabilidade dos produtos oriundos de resíduos da construção civil afeta as propriedades dos agregados, sendo importante identificar sua origem e composição, de forma a evitar que a aplicação sem sucesso destes resíduos gere preconceito com o seu uso. Outros fatos que podem comprometer a utilização de agregados de RCD são a oferta limitada para uso em pavimentação e uso de

frações inadequadas ou em condições adversas ao que são indicados, como em pavimentos com tráfego mais exigentes que o compatível com a sua capacidade de suporte.

Desta forma, embora existam normas (LEITE, 2007) e diversos trabalhos (MIRANDA et al., 2009) que comprovem que o RCD possa ser uma alternativa viável para ampliar a oferta de materiais para construção de pavimentos, muitos técnicos ainda têm ressalvas quanto ao seu emprego. No Município de Curitiba, por exemplo, o Decreto Municipal nº 852/2007 (CURITIBA, 2007) previa seu uso nas obras públicas de pavimentação, no entanto, segundo os técnicos da Secretaria Municipal de Obras (SMOP), na época em que o decreto foi publicado não existiam fornecedores suficientes, bem como fração de RCD com qualidade aceitável. Por outro lado, um dos objetivos deste Decreto era justamente fomentar o mercado local de beneficiamento deste tipo de resíduo. Atualmente, o decreto continua vigente e desde 2015 a Prefeitura está adquirindo resíduos para pequenas obras de reparos em pavimentos, mas o número de fornecedores capazes de entregar material em quantidade suficiente ainda é baixo. A possibilidade de ampliar o uso destes materiais foi uma grande motivação para desenvolver este estudo. Portanto, é de suma relevância definir se este material é adequado ou não para o emprego em obras viárias do Município de Curitiba.

O sistema viário do município de Curitiba contém mais de 4.600 km de pavimentos de diversos tipos, com destaque para o tipo de baixo custo, denominado “antipó”, presente em 58,4% das vias (IPPUC, 2016). A maioria deste tipo de pavimento está com a vida útil vencida e apresenta problemas estruturais graves, principalmente devido ao incremento do tráfego nas últimas décadas. Além disso, a cidade tem mais 8,13% dos seus pavimentos com revestimento primário (IPPUC, 2016), ou seja, são vias de saibro que ainda não receberam revestimento asfáltico e são caracterizadas por apresentar pó em tempo seco e lama em dias de chuva.

Considerando o cenário nacional de população urbana (IBGE, 2010) e a demanda de infraestrutura (CNT, 2016), torna-se imprescindível a busca por novas filosofias para atender às necessidades dos cidadãos. As obras de infraestrutura apresentam limitação de recursos financeiros e um cenário de escassez de recursos naturais para extração, sendo superior às obras de moradias; por exemplo: a construção de uma pista com duas faixas de rolagem consome cerca de cinco vezes

mais agregados do que o a construção de um edifício de apartamentos de 15 andares (BALBO, 2007).

Nesta perspectiva, a utilização dos resíduos de construção de demolição (RCD) como agregados reciclados traz diversos benefícios, como uma redução do custo operacional de aterros sanitários, melhoria nas condições de saneamento da cidade, economia com a limpeza urbana, redução da extração natural e desenvolvimento de um novo mercado pelo interesse na aquisição destes materiais (LEITE, 2007). Segundo Angulo e John (2006), os RCD produzidos no Brasil são vistos como materiais de baixa periculosidade, predominantemente de caráter inerte, sendo que o impacto mais importante é causado pela ocupação de áreas territoriais ou de aterros devido ao grande volume gerado. Por outro lado, nestes resíduos podem ser encontrados materiais orgânicos, substâncias perigosas e embalagens diversas, o que provoca um impacto ambiental muito negativo. A Prefeitura Municipal de Curitiba tem adquirido agregados reciclados de concreto (ARC) para utilização em obras de manutenção de pavimentos, mas ainda não houve a superação de barreiras culturais quanto a sua utilização na substituição parcial aos agregados naturais. No entanto, é preciso entender as particularidades dos agregados reciclados, uma vez que sua origem é diferenciada e suas características não são tão uniformes como as dos agregados naturais (ANGULO E JOHN, 2006).

1.1 ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO

O estudo foi dividido em 5 seções: introdução, revisão bibliográfica sobre o tema, materiais e métodos, resultados encontrados e as respectivas discussões, e conclusões. A introdução aborda os aspectos gerais do tema sobre agregados reciclados, a problemática existente e os objetivos para comprovar a hipótese de uso de RCD para compor pavimentação urbana. A revisão literária aborda aspectos relacionados ao RCD: definição, histórico, geração, legislação, usinas de tratamento, possíveis usos de RCD e parâmetros que devem ser analisados para enquadrar os agregados reciclados como utilizáveis. Em seguida, apresenta-se o que é o pavimento urbano, quais materiais podem ser empregados na sua construção, os métodos de dimensionamento utilizados e um tópico sobre manutenção de pavimentos urbanos.

A seção de materiais e métodos relata as cinco etapas seguidas para desenvolver o estudo: identificação e levantamento dos dados sobre os fornecedores de agregados reciclados na região de Curitiba; tipos de trechos construídos para avaliação preliminar dos agregados reciclados em recuperação de base de pavimentos e de base de ciclovia, tratamento superficial betuminoso (TSB) e em via de revestimento primário; avaliação laboratorial dos requisitos para utilização de agregados reciclados e determinação dos limites em que os agregados reciclados podem ser usados frente aos requisitos de resistência mecânica e expansão; construção de trechos com controle dos tipos de RCD; e avaliação dos custos e ganhos ambientais envolvidos no uso de agregados reciclados em bases de pavimentos na cidade de Curitiba. Os resultados obtidos e sua análise seguem a mesma linha de apresentação. A conclusão reflete os fundamentos de decisão da viabilidade ou não de uso de frações de RCD produzido em Curitiba, sua aplicação na pavimentação municipal e sugestão de estudos futuros.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o uso dos agregados de resíduos da construção e demolição (RCD) classe A comercializados na região de Curitiba para execução das camadas de base e sub-base de pavimentos urbanos como alternativa a agregados naturais.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Identificar fornecedores, tipos de RCD produzidos e seu custo de aquisição na região de Curitiba;
- b) Avaliar preliminarmente a viabilidade de uso de agregados reciclados como materiais de base e sub-base na recuperação de trechos de pavimentos de forma empírica;
- c) Caracterizar os agregados reciclados produzidos em Curitiba de acordo com os parâmetros exigidos pelas normas existentes;

- d) Determinar o efeito da compactação e da umidade sobre a resistência mecânica dos agregados reciclados;
- e) Avaliar a viabilidade técnica de execução de vias com a utilização de agregados reciclados após análise dos materiais;
- f) Avaliar os aspectos econômicos e ambientais da utilização de agregados reciclados da construção civil em obras de pavimentação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são uma parcela mineral dos resíduos gerados durante o ciclo de vida das construções civis, o que inclui blocos, concreto e outros materiais de alvenaria, solo, rocha, madeiras, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, entre outros. A maior dificuldade encontrada no seu processo de reciclagem é a grande variabilidade que apresenta em sua composição (ULSEN et al., 2014).

Os resíduos da construção civil têm sido utilizados há muito tempo. No entanto, após a Segunda Guerra Mundial, houve grande impulso no seu emprego devido à grande quantidade de entulhos gerada nos combates e a alta demanda de insumos para reconstrução de cidades destruídas. A reciclagem destes “resíduos” possibilitou a redução de custos com limpeza e a garantia de que os países não sofressem com o desabastecimento de materiais de construção (GRUBBA, 2009). Desta forma, a Europa pode ser considerada pioneira no desenvolvimento de tecnologias que viabilizassem o uso de resíduos da construção civil em novas obras (GRUBBA, 2009). Segundo Silva (2009), a Alemanha foi o país que iniciou os trabalhos de reciclagem de RCD; no entanto, houve redução destas atividades até o ano de 1990, quando ocorreu a reunificação das partes Oriental e Ocidental. A partir desta data, estima-se que o volume de material oriundo de demolições seletivas e desconstrução chegava a 43 milhões de toneladas e que a reciclagem atingia 35% deste volume, esta taxa atingiu 60% em 1995. No entanto, atualmente, o padrão de qualidade dos agregados do pós-guerra não é mais aceito, devido à evolução dos materiais empregados na construção civil europeia (MIRANDA, 2005).

Segundo Miranda et al. (2009), a primeira pesquisa relacionada aos agregados reciclados no Brasil é de 1986, na qual se estudou sua aplicação em argamassas, seguido por pavimentos e concretos. A partir do ano 2000 houve um desenvolvimento sistemático de trabalhos relacionados ao tema, tais como, análise de sua variabilidade, o uso em argamassas, em concretos pré-moldados e em concretos em geral.

O mercado de resíduos da construção é uma importante atividade comercial na Europa. Na Alemanha, o setor de gerenciamento de resíduos movimenta cerca de 40 bilhões de euros anualmente e emprega cerca de 200 mil pessoas em 3.000 companhias (NELLES et al., 2016). Por ser um setor economicamente importante na Europa, a norma EC 1013/2006 (EC, 2017) foi instituída para tratar da movimentação deste tipo de material entre os países. Um exemplo é a Alemanha, que exportou 420.000 toneladas de RCD em 2013 principalmente para a Holanda (66%) e a França (32%), e importou cerca de 962.000 toneladas do material, principalmente da Itália (34%) e Luxemburgo (25%) (DELLOITE, 2015).

A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2015) relata que o segmento da RCD ainda é incipiente no Brasil, sendo que não foram encontrados dados para seu comércio internacional. Este fato pode ocorrer devido à peculiaridade econômica de disposição.

A disposição de RCD em países europeus pode ser de 2 a 23 vezes mais cara que os preços praticados no Brasil (PINTO, 1999). Na Alemanha, por exemplo, a reciclagem é mais barata do que a disposição final (RAO et al., 2005). No Brasil, a principal política pública voltada para o gerenciamento de RCD é a remoção (coleta) e disposição em aterro. Este fato pode estar relacionado às questões políticas (pela ausência da continuidade das ações iniciadas em uma gestão anterior a atual), pelo recebimento de valores significativos por empresas contratadas pela administração municipal como pagamento por serviços de remoção (remunerados por quantidade de RCD removida), pela falta de conscientização da população e pela pouca fiscalização pra coibir os descartes irregulares deste tipo de material (SCHNEIDER, 2003).

2.2 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n° 307, publicada em 2002 (BRASIL, 2002), é considerada um marco na gestão dos resíduos da construção, pois estabeleceu prazos para o enquadramento de municípios e de geradores de RCD. Por meio dela foi definido que esses resíduos não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, áreas de “bota fora”, encostas, corpos d’água, lotes vagos e áreas protegidas por Lei (SCHNEIDER, 2003). A partir desta

publicação, o Brasil oficializa a intenção em adotar o princípio da prevenção de resíduos e evitar que eles sejam encaminhados para aterro. Segundo Nelles et al. (2016), isto já ocorre na Alemanha desde 2005, a qual tem a prevenção na base da sua hierarquia de gerenciamento de resíduos sólidos e, em último caso, a disposição em aterro. A Resolução CONAMA n° 348/2004 (BRASIL, 2004) alterou parcialmente a Resolução CONAMA n° 307/2002, pois incluiu o amianto como resíduo perigoso, e divide os RCD em quatro classes:

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 infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

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

Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros; aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros; bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) relacionou alguns instrumentos da legislação brasileira, além da Resolução CONAMA n° 307/2002, referentes à questão dos resíduos sólidos no Brasil (Quadro 1).

Algumas normas técnicas brasileiras tratam de resíduos sólidos com interesse para RCD (Quadro 2), sendo que duas estão diretamente ligadas a este estudo: a Norma Brasileira (NBR) n° 15.116 (ABNT, 2004b) apresenta os requisitos exigidos que os materiais devem apresentar para serem empregados na produção de concreto não estrutural e em camadas de pavimentos e a NBR n° 15.115 (ABNT, 2004a) define as especificações para execução de camadas de pavimentos.

QUADRO 1 – INSTRUMENTOS LEGAIS E NORMATIVOS DE POLÍTICAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE ABRANGÊNCIA NACIONAL

Documento	Descrição
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 (PNRS), cria o Comitê Interministerial da PNRS e o Comitê Orientador para a Implantação dos sistemas de logística reversa, e dá outras providências.
Lei Federal nº 12.305/2010	Institui a PNRS, 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 nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, nº 8.036, de 11 de maio de 1990, nº 8.666, de 21 de junho de 1993 e nº 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 307/2002	Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC.
Lei Federal nº 10.257/2001	Estatuto das Cidades: regulamenta os Artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.
Lei Federal nº 9.605/1998	Lei de Crimes Ambientais: 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.

FONTE: IPEA (2012).

QUADRO 2 – NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS NA ÁREA DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Norma	Descrição
NBR 10.004 (ABNT,2004)	Resíduos sólidos (classificação).
NBR 15.112 (ABNT,2004)	RCC e resíduos volumosos - áreas de transbordo e triagem (diretrizes para projetos, implantação e operação).
NBR 15.113 (ABNT,2004)	RCC e resíduos inertes - aterros (diretrizes para projetos, implantação e operação).
NBR 15.114 (ABNT,2004)	RCC - áreas para reciclagem (diretrizes para projetos, implantação e operação).
NBR 15.115 (ABNT,2004)	Agregados reciclados de RCD - execução de camada de pavimentação (procedimentos).
NBR 15.116 (ABNT,2004)	Agregados reciclados de RCD - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural (requisitos).

FONTE: IPEA (2012)

2.3 GERAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL E NO MUNDO

Os resíduos da construção e demolição são apontados mundialmente como parcela relevante do total de resíduos gerados (Tabela 1). Os Estados Unidos produziram em 2014 534,1 milhões de toneladas de RCD, sendo que mais de 90% deste total foi gerado em obras de demolição (EPA, 2016). Segundo a Comissão Ambiental da União Europeia, os resíduos de construção e demolição representam de 25 a 30% dos resíduos gerados dentro dos países do bloco (EC, 2016). Também, de acordo com relatório publicado em 2011, os 27 países que compunham a União Europeia na época geravam cerca de 531,38 milhões de toneladas de RCD anualmente (excluindo materiais de escavação), com uma taxa média de reciclagem ou reuso de 46%. Alguns países, como Dinamarca, Estônia, Alemanha, Irlanda e Holanda, destacam-se com taxas superiores a 80% de reciclagem e reuso de RCD (EC, 2011).

Dentro da Europa, existem países que fogem à característica típica de “países recicladores”, como é o caso da Noruega, que reciclou 10 a 20%, sendo este fato atribuído à abundância e qualidade dos agregados naturais (PETKOVIC et al., 2004). Esta mesma situação é verificada no Brasil e pode ser um dos motivos das baixas taxas de reciclagem de RCD no nosso país.

A Austrália gerou cerca de 19 milhões de toneladas de resíduos da construção civil em 2009, e a taxa de reciclagem foi em torno de 55% (DEE, 2011). O México gera em torno de 6,08 milhões de toneladas de RCD por ano, com uma taxa de reaproveitamento (reciclagem ou reuso) de apenas 4% (CMIC, 2013). A China gera anualmente cerca de 200 milhões de toneladas de RCD (WANG et al. 2013), o que pode ser considerado um baixo volume em relação a sua numerosa população. Já a Índia gera cerca de 14,5 milhões de toneladas de RCD por ano (PAPPU et al., 2007), mas este dado considera apenas descartes regulares e pode representar um número muito inferior à realidade do país (ARIF et al., 2012). A reutilização de RCD na Índia varia de 25 a 75% de acordo com o tipo de obra que está sendo construída (PAPPU et al., 2007).

No Brasil, a geração anual de RCD, é aproximadamente 44,6 milhões de toneladas, considerando apenas os dados oficiais dos serviços públicos (ABRELPE,

2014), mas este número pode chegar a 101,4 milhões de toneladas segundo estimativa da ABRECON (2015). A taxa de reciclagem no Brasil é em torno de 21% (ABRECON, 2015). Nota-se que países em desenvolvimento, como China, Brasil, Índia e México, não apresentam dados oficiais de geração de RCD, sendo estes valores encontrados em estudos realizados por autores ou entidades independentes, enquanto EUA, Austrália e União Europeia apresentam dados oficiais que refletem melhor a geração total de resíduos e garantindo maior confiabilidade dos resultados apresentados (Tabela 1).

TABELA 1 – GERAÇÃO TOTAL, REAPROVEITAMENTO E GERAÇÃO PER CAPITA DE RCD NO BRASIL E NO MUNDO

Local	Geração de RCD (milhões de ⁽¹⁾ ton/ano)	Reapro-veitamento (%)	População (milhões de hab)	Geração per capita (kg/hab/ano)	Fonte ⁽¹⁾
USA	534,1	-	318,6	1.676,4	EPA (2016)
União Europeia	531,4	46	442,8	1.200,1	EC (2011)
Austrália	19,0	55	21,7	876,0	DEE (2009)
China	200,0	-	1.357,0	147,4	WANG et. al (2013)
México	6,1	4	122,5	49,6	CMIC (2013)
Índia	14,5 ⁽²⁾	25 a 75	1.180,0	12,3	PAPPU et al. (2007)
Brasil	44,6	-	202,8	219,9	ABRELPE (2014) ⁽²⁾
Brasil	101,4	21	202,8	500	ABRECON (2015)

FONTE: O Autor (2017). ⁽¹⁾ os dados de geração de RCD são em função dos estudos encontrados, e por este motivo não são todos para o mesmo ano, no entanto, servem para comparação entre as nações. ⁽²⁾ considera apenas os dados oficiais de coleta de RCD.

Na maioria das cidades brasileiras, a geração de resíduos da construção civil é diagnosticada por meio de estimativas de área construída, quantificação de volumes por empresas coletoras e monitoramento de descargas nas áreas de disposição final dos resíduos da construção civil, sendo que as duas primeiras alternativas podem ser realizadas de forma confiável por municípios que mantenham um cadastro de construções licenciadas (PINTO, 1999).

Além de dados de geração anual de RCD, é interessante observar que as quantidades geradas são variáveis em função das características da obra (Quadro 3)

que está sendo analisada (reforma, construções novas ou aplicação de práticas de gerenciamento), nas quais os valores podem variar de 34,15 a 300 kg/m².

QUADRO 3 – GERAÇÃO DE RCD EM CANTEIROS DE OBRA - BRASIL

Descrição do estudo	Geração (kg/m² construído)	Autor
Construção de Escola Municipal, com aplicação de gerenciamento.	34,15	Mariano (2008)
Construção de duas edificações residenciais, cada uma com 105 m ² , adotando práticas de gerenciamento.	42,9	Tozzi (2006)
Estudo realizado na cidade de João Pessoa considerando a soma entre as quantidades geradas e a estimativa das disposições irregulares.	60,4	Pimentel (2013)
Estimativa considerando perda média de materiais na fase construtiva de 25% e geração de entulhos em torno de 50% em obras de reforma.	150	Pinto (1999)
Estimativa baseada em observações em canteiro de obras.	300	Monteiro et al. (2001)

FONTE: O Autor (2017)

No cenário internacional, a construção de novos edifícios pode gerar 120 kg de RCD por m² construído, e para obras de demolição este valor salta para 1.129 kg por m² de demolição (EC, 2011). Segundo Monteiro et al. (2001), a média de geração de RCD para os países desenvolvidos é da ordem de 100 kg/m². A exemplo do cenário internacional, no Brasil também ocorre predominância de geração de resíduos em obras de reforma, ampliação e demolição (MIRANDA et al., 2009).

Destaca-se que os RCD englobam diversos materiais, tais como: concreto, cerâmica, argamassa, madeira, papel, fibrocimento, plástico, etc. Estudos realizados por alguns pesquisadores brasileiros mostraram que existe certa predominância na geração de resíduos classe A (TOZZI, 2006 e MONTEIRO, 2001), com exceção de Mariano (2008) no qual o material predominante foi a madeira (49,2%) (Quadro 4). Nos dados internacionais apresentados nos relatórios da Comissão Europeia (EC, 2011), para o caso da cidade de Madrid, e nos Estados Unidos (EPA, 2016) também ocorre destaque para a geração de resíduos classe A (concreto, cerâmica e rochas), objetos do estudo desenvolvido neste trabalho. No caso dos EUA, apenas 2% dos RCD são classificados como cerâmica e 84% tem origem cimentícia, este fato pode

estar relacionado ao tipo diferenciado de construção utilizada em alvenarias (Quadro 4).

QUADRO 4 – COMPOSIÇÃO DO RCD, EM % DE MASSA, SEGUNDO DIVERSOS ESTUDOS

Componente	Nacional ⁽¹⁾			Internacional ⁽²⁾	
	Mariano (2008)	Tozzi (2006)	Monteiro (2001)	Madrid (EC, 2011)	EPA (2016)
Concreto e Cerâmica	34,1	48,2	29,0	75	86
Argamassa	8,6	42,8	63,0		
Madeira	49,2	2,0	1,0	4	7
Papel, fibrocimento, plástico e outros	8,1	7,0	7,0	21	7

FONTE: O Autor (2017) ⁽¹⁾ Dados nacionais: Adaptado de MARIANO (2008). ⁽²⁾ Dados Internacionais: Adaptado de EC (2011) e EPA (2016)

2.4 USINAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

O tratamento dos resíduos de construção civil pode ser iniciado no próprio canteiro de obras com a separação deles por classe, conforme a Resolução CONAMA n° 307/2002 (BRASIL, 2002). Extrapolando os limites dos canteiros de obra, existem usinas que fazem a separação e tratamento dos RCD.

O poder público tem se mostrado um precursor importante para incentivar o uso de resíduos da construção e demolição. As primeiras usinas de reciclagem foram instaladas pelas prefeituras de São Paulo (1991), Belo Horizonte (1994) e Londrina (1993) (MIRANDA et al., 2009). No entanto, em 2015, segundo a ABRECON (2015), 83% das 105 usinas cadastradas na entidade são privadas, e estima-se que existam ao menos 310 usinas espalhadas pelo país. De acordo com a ABRECON (2015), o menor número de usinas públicas (10%) está relacionado à burocracia envolvida em verbas públicas, demora na reposição de peças defeituosas ou desgastadas e possível perda de interesse da administração pública, principalmente quando há mudança de gestão. A título de comparação, a Alemanha possuía 2.073 instalações de tratamento em 2010 (DELLOITE, 2015), lembrando que ela tem na ordem de metade da população brasileira e que seu tamanho é similar ao do estado do Mato Grosso do Sul (18% da área total do Brasil).

As usinas existentes no Brasil podem ser classificadas como fixas (Figura 2) ou móveis, e conforme a ABRECON (2015), 74% são do primeiro tipo, 21% do segundo e 5% são classificadas como ambas. A flexibilidade, a redução de mão de obra e a facilidade de reciclar o RCD na própria obra têm sido fatores que mostram um crescimento das usinas móveis em comparação com as usinas fixas (ABRECON, 2015).

FIGURA 2 – USINAS FIXAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL



FONTE: O Autor (2015)

O foco de produção destas usinas são os agregados reciclados. A capacidade instalada de produção, somando todas as usinas do país (310 usinas cadastradas), é de 3.193.000 m³/mês, contudo a produção efetiva é de 1.450.500 m³/mês, ou seja, apenas 45% da capacidade instalada está sendo utilizada. Considerando a geração *per capita* de 500 kg/hab.ano e uma densidade de 1.200 kg/m³, o volume de resíduo tratado representa apenas 21% da geração de RCD no Brasil, mas poderia chegar a 46%, caso todas as usinas trabalhassem com 100% da capacidade (ABRECON, 2015). Este índice seria similar à média dos países que compõe a União Europeia, conforme apresentado na Tabela 1.

A realização de ensaios de controle tecnológico dos materiais produzidos ainda não faz parte do cotidiano destas usinas. Apenas 23% delas realizam ensaios com frequência, as demais o fazem de forma esporádica, apenas quando é solicitado ou nunca os fizeram. Este dado é muito importante, pois revela que o preconceito existente com os agregados reciclados pode vir pela falta de controle na qualidade

dos materiais produzidos, o que acaba dificultando a inserção destes produtos no mercado (ABRECON, 2015).

2.5 POSSÍVEIS USOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – CLASSE A

Segundo as normas brasileiras NBR n° 15.115 (ABNT, 2004a) e NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b), os agregados reciclados podem ser utilizados em concretos sem função estrutural e em pavimentos (Figura 3) como base, sub-base ou reforço de leito, além de vias de revestimento primário (saibro). No entanto, existem estudos no sentido de ampliar o uso destes materiais em argamassas, produção de asfalto e concretos estruturais (MIRANDA et al., 2009). Na Alemanha, por exemplo, os usos são semelhantes ao Brasil. No entanto, Weil (2016) destaca que os poluentes presentes, como tintas e solventes, e os requisitos de proteção do solo e da água podem limitar o uso destes materiais, e, desta forma, sua destinação pode acabar sendo o aterro sanitário.

FIGURA 3 – AGREGADO RECICLADO SENDO UTILIZADO EM BASE DE PAVIMENTO



FONTE: Leite (2007) - a) espalhamento do agregado reciclado b) compactação do agregado reciclado

Segundo Basten (2015), na Alemanha, 51,7% dos resíduos reciclados da construção civil foram destinados para a construção de estradas, 19% em concretos, 20,2% em obras de terraplanagem e 9,1% em outros tipos de valorização. Não foram encontrados dados da destinação dos resíduos reciclados no Brasil. No entanto, a

ABRECON (2015) apresenta como principais consumidores dos materiais produzidos, as construtoras (28%), os órgãos públicos (24%), as pessoas físicas (20%) e as pavimentadoras (14%). Logo, é possível identificar que os principais usos no Brasil, assim como na Alemanha, são a construção de estradas, concretos e terraplanagem (aterros).

2.5.1 Estudos de uso de resíduos da construção civil em pavimentação no Brasil

A primeira via brasileira que utilizou agregados reciclados foi no município de São Paulo, em 1984, e na época apresentou desempenho satisfatório (BODI et al. ⁽¹⁾, 1995 *apud* MOTTA, 2005). Após este primeiro registro, diversos estudos foram realizados no Brasil para avaliar os agregados reciclados de RCD. No geral, se apresentaram como boas alternativas aos agregados naturais na construção de camadas de pavimentos, e muitos evidenciaram a necessidade de controle tecnológico rigoroso (MOTTA, 2005). No entanto, muitos destes estudos ocorreram em escala laboratorial e não foram avaliados com a aplicação em trechos experimentais.

Laboratorialmente, verificou-se que as condições de resistência de um solo local da cidade de São Luis-MA foram significativamente melhoradas quando ele foi misturado com RCD do tipo misto. Os resultados apontaram que esta mistura poderia ser utilizada como sub-bases de pavimentos e/ou reforço de subleito (HOTER GAL et al., 2009).

A mistura de 25% de RCD com 75% de solo laterítico (tipo de solo rico em óxidos de ferro e alumínio) resultou em um material coeso e com boa resistência testado em laboratório e posteriormente em campo como base de pavimento, apresentando resultados satisfatórios para esta finalidade (AMORIM, 2013).

Ensaio laboratoriais de amostras coletadas da sub-base de um pavimento executado com RCD, na cidade de Fortaleza-CE, apresentaram resultados satisfatórios de CBR (superior a 40%), expansão, compactação e granulometria (ARAÚJO et al., 2017).

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

Os agregados reciclados produzidos na usina de reciclagem do município de João Pessoa-PB mostraram que os materiais eram adequados quanto à granulometria e quanto ao índice de suporte Califórnia (*California Bearing Ratio* - CBR). No entanto, não se enquadraram em outros requisitos, como índice de forma e porcentagem de material passante na peneira nº 40 (0,42 mm), que poderiam ser facilmente corrigidos para serem uma alternativa aos materiais para pavimentação (NÓBREGA e MELO, 2009).

Dois ensaios de campo no estudo de caso de Goiânia revelaram resultados antagônicos: um trecho apresentou problemas enquanto o outro apresentou bom desempenho. Esta diferença foi atribuída à falta de controle de operação, como controle de umidade e de compactação, no primeiro trecho (RESPLANDES, 2007). O trecho que apresentou bom desempenho foi avaliado após 4 anos da sua construção e verificou-se que apresentava bom comportamento funcional e estrutural (COSTA et al., 2010).

No trecho experimental estudado por Leite (2007) em São Paulo os agregados reciclados utilizados como base e sub-base de pavimento apresentaram desempenho similar ao da brita graduada simples, quando compactados adequadamente, ou seja, quando executado de acordo com os parâmetros de projeto calculados em laboratório. A utilização de RCD em uma obra de pavimentação na cidade de Fortaleza-CE gerou economia de 72,71% em relação à utilização de brita graduada simples e evitou que 2.515,60 m³ de entulhos fossem descartados no ambiente urbano (ARAUJO et al., 2017).

2.6 PARÂMETROS DE ANÁLISE DE AGREGADOS RECICLADOS

Segundo Bernucci et al. (2008), devem ser empregados métodos de seleção e caracterização das propriedades dos materiais de base, sub-base e reforço de subleito. A seleção é responsável por averiguar preliminarmente as características de natureza e a caracterização avalia as propriedades geotécnicas no estado compactado, uma vez que, neste estado, os materiais devem ser resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com a sua estrutura.

Os agregados reciclados são classificados como materiais granulares que não apresentem coesão (a aparente coesão que existe é dada pela estabilização granulométrica após a compactação) e que não resistem à tração, trabalhando principalmente com os esforços de compressão (BERNUCCI et al., 2008). Além dos materiais granulares, existem ainda os materiais estabilizados quimicamente ou cimentados, e materiais asfálticos. A NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) prevê que quando os materiais reciclados não apresentem as características desejadas de resistência e expansão, podem ser estabilizados com adição de cimento e cal, modificando sua classificação para materiais estabilizados quimicamente ou cimentados.

2.6.1 Composição e Caracterização dos agregados reciclados

2.6.1.1 Composição

De acordo com a Resolução CONAMA n° 307/2002 (BRASIL, 2002), os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados se enquadram na Classe A, ou seja, classe a qual pertencem os agregados reciclados da construção civil destinados às obras de pavimentação ou concretos sem função estrutural. A NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) distingue ainda duas classes de agregados reciclados: agregado de resíduo de concreto (ARC), no qual sua fração graúda é composta de no mínimo 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland e rochas, e agregado de resíduo misto (ARM), no qual sua fração graúda contém menos de 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland e rochas. O Anexo A da NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) fixa os parâmetros para determinar a composição (relação entre as massas das espécies minerais e materiais não minerais identificadas pelo critério visual e a massa total de fragmentos, expressa percentualmente).

A porcentagem de materiais não minerais (madeira, plástico, betume, vidros, gesso, vidrados cerâmicos, e materiais carbonizados) nos agregados miúdos é determinada conforme Anexo B da NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) por meio de líquidos densos. Para o uso em pavimentos, tanto para a fração graúda quanto para a fração miúda, o valor de materiais não minerais de mesmas características não deve ser superior a 2% e para materiais não minerais de características distintas não deve ultrapassar os 3% em relação à massa total do agregado reciclado.

2.6.1.2 Granulometria

Segundo Bernucci et al. (2008), a distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi em várias propriedades importantes, incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e deformação permanente. A análise granulométrica é realizada de acordo com a norma DNER-ME nº 083 (DNER, 1998b).

A expressão “bem graduado” expressa o fato de que a existência de grãos com diversos diâmetros confere ao solo, em geral, melhor comportamento sob o ponto de vista da engenharia. As partículas menores ocupam os vazios correspondentes às maiores, criando entrosamento, do qual resulta menor compressibilidade e maior resistência (PINTO, 2006). A granulometria é um importante ensaio, pois fornece os elementos para classificação dos materiais e suas características de uniformidade.

A norma DNIT-ES nº 141/2010 (DNIT, 2010c) apresenta as especificações de serviços de bases estabilizadas granulometricamente e as faixas granulométricas em que podem ser enquadradas as amostras de material existente (Quadro 5). A estabilização granulométrica pode ser definida como um processo de melhoria da capacidade resistente de materiais “*in natura*” ou mistura de materiais, mediante emprego de energia de compactação adequada, de forma a se obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade (DNIT, 2006).

QUADRO 5 – FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DE BASES SEGUNDO O DNIT

Tipos			Para N > 5 x 10 ⁶				Para N < 5 x 10 ⁶		Tolerância das faixas
Peneiras			A	B	C	D	E	F	
ABNT	Mesh	mm	% em peso passando						
2	-	50,8	100	100	-	-	-	-	±7
1	-	25,4	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8	-	7,93	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
4	4	4,76	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
10	10	2	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
40	40	0,42	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
200	200	0,074	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

FONTE: DNIT (2010c)

Para materiais a serem empregados na sub-base, segundo a norma DNIT-ES nº 139/2010 (DNIT, 2010a) é exigido que o material pertença ao índice de grupo 0 (IG 0) de acordo com a classificação de solos HRB-AASHO, ou seja, são características deste tipo de material uma granulometria que tem no máximo 35% dos grãos passando na peneira 200 (0,075 mm) e índice de plasticidade (IP) de no máximo 10. O HRB-AASHO (*Highway Research Board*) da Associação Americana de Transportes, é uma classificação de solos para finalidades rodoviárias. Baseia-se na classificação granulométrica, nos seus índices físicos (limites de liquidez e plasticidade) e no índice de grupo; este último é um parâmetro calculado por equação matemática e que varia de 0 (solo com ótima capacidade de suporte) a 20 (solo com péssima qualidade de suporte), no seu cálculo são considerados o limite de liquidez, índice de plasticidade e porcentagem de material passante na peneira 200 (0,075 mm) (BALBO, 2007).

A Prefeitura de Curitiba utiliza em seus procedimentos internos a norma PMC-ES nº 021/99 (CURITIBA, 1999) que estipula uma faixa granulométrica para o material denominada brita 4-A (Quadro 6).

QUADRO 6 - FAIXA GRANULOMÉTRICA BRITA 4-A

PENEIRAS	% PASSANDO	PENEIRAS	% PASSANDO	PENEIRAS	% PASSANDO
4"	100	1 ½"	65-90	Nº 4	20-60
3 ½"	95-100	1"	60-85	Nº 10	10-55
3"	90-100	¾"	50-80	Nº 40	5-30
2 ½"	85-100	½"	40-75	Nº 200	0-15
2"	75-95	3/8"	30-70		

FONTE: Curitiba (1999)

Da análise granulométrica podem ser obtidos ainda quatro outros fatores que são utilizados na classificação do material: o diâmetro máximo característico (DMC), coeficiente de uniformidade, coeficiente de curvatura e teor de material passante na peneira nº 40 (0,42 mm). Segundo Bernucci et al. (2008), estes parâmetros estão relacionados com a estabilidade da mistura e por isso devem ser avaliados. A NBR nº 15.116 (ABNT, 2004b) estipula que o coeficiente de uniformidade do material reciclado deve ser superior a 10 ($C_u > 10$). Esta relação representa a falta de uniformidade granulométrica do material, pois seu valor diminui quando o material é mais uniforme. Materiais com uniformidade menor que 15 indicam uniformidade média ou muito

uniforme, o que não é desejado devido aos índices de vazios que ficaram entre os grãos (LEITE, 2007). O coeficiente de curvatura também avalia a uniformidade do material e seu valor deve estar entre 1 e 3 (LEITE, 2007).

A dimensão máxima característica (DMC) dos grãos é um dos fatores classificatórios dos agregados por estar relacionada com o entrosamento entre as partículas e atrito entre elas, e, conseqüentemente, com a estabilidade da camada (BERNUCCI et al., 2008). Este parâmetro é definido pela norma DNER-ME nº 083 (DNER, 1998b) como a abertura da peneira em que ficar retida ou acumulada uma porcentagem do agregado igual ou imediatamente inferior a 5%. A NBR nº 15.116 (ABNT, 2004b) determina que a DMC para agregados reciclados seja 63,5 mm. A especificação de compra de agregados reciclados do município de Curitiba determina que para o material “brita graduada de concreto reciclado” e “brita graduada reciclada mista” a DMC deve ser de 25 mm; e para “brita 4A de concreto reciclado” e “brita 4A reciclada mista” a DMC deve ser 87,5 mm (CURITIBA, 2015), valor superior ao estabelecido pela NBR nº 15.116 (ABNT, 2004b), mas que corresponde a DMC máxima da brita 4A natural especificada pela norma interna PMC-ES nº 021 (CURITIBA, 1999) citada anteriormente.

A NBR nº 15.116 (ABNT, 2004b) limita o valor de material passante na peneira nº 40 (0,42 mm) entre 10 e 40%. A especificação de compra de agregados reciclados de Curitiba (CURITIBA, 2015) determina que para o material “brita graduada de concreto reciclado” e “brita graduada reciclada mista” o teor de material passante na peneira 0,42 mm deve situar-se entre 8 e 20%, e para “brita 4A de concreto reciclado” e “brita 4A reciclada mista” este parâmetro deve estar entre 5 e 30%. Estas limitações estão intimamente ligadas a uma curva granulométrica contínua e bem graduada (LEITE, 2007).

2.6.1.3 Índice de forma

A forma das partículas dos grãos influencia na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar a máxima densidade. Quanto mais cúbicas forem as partículas e mais afiladas forem suas arestas, melhor serão as características de intertravamento entre os grãos compactados (BERNUCCI et al., 2008). A NBR nº 15.116 (ABNT,

2004b) estipula que os agregados reciclados sejam ensaiados pela NBR n° 7.809 (ABNT, 2005) e resultem em um índice de forma menor que 3,0 para agregados graúdos. O índice de forma é definido por tal norma como a relação entre o comprimento (maior dimensão possível de ser medida em qualquer direção do grão) e a espessura (menor dimensão possível entre planos paralelos entre si) dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe.

2.6.1.4 Equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia é utilizado para medir a limpeza dos grãos em relação a alguns materiais deletérios como vegetação, conchas e grumos de argila presentes sobre a superfície das partículas dos agregados. Apesar da possibilidade da limpeza ser verificada visualmente, uma análise granulométrica com lavagem é mais eficiente (BERNUCCI et al., 2008). A norma DNER-ME n° 054 (DNER, 1997a) determina as condições de ensaio de equivalente de areia, que consiste na relação volumétrica correspondente à altura do nível superior da areia e à altura do nível inferior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo numa proveta, em condições pré-estabelecidas pela norma (DNER, 1997a). Embora este parâmetro não seja considerado na NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b), ele está presente na especificação de compra de agregados reciclados da Prefeitura de Curitiba e o seu valor deve ser maior ou igual a 40% (CURITIBA, 2015).

2.6.1.5 Massa específica e absorção

Segundo Pinto (2006), as relações entre quantidade de matéria (massa) e volume são denominadas massas específicas, sendo geralmente expressas em t/m^3 , kg/dm^3 ou g/cm^3 , enquanto que as relações entre pesos e volumes são nomeadas pesos específicos e expressas em kN/m^3 . O método de ensaio DNER-ME n° 081 (DNER, 1998c) especifica a determinação das densidades de agregados graúdos, utilizando o conceito de densidade relativa. Já o método de ensaio DNER-ME 084 (DNER, 1995a) é adotado para determinar a densidade de agregados graúdos miúdos, com o conceito de densidade real dos grãos.

A norma DNER 152 (DNER, 1995b) determina o método de ensaio para cálculo da massa unitária pela relação entre o peso do agregado solto e o uso de um recipiente com dimensões pré-definidas. Este valor é interessante para controle de recebimento de material em campo.

Segundo Carneiro et al. (2001), a absorção indica a quantidade de água que um agregado é capaz de absorver e é uma das diferenças mais marcantes entre o agregado natural e o reciclado. Esta propriedade pode implicar numa queda na resistência mecânica por enfraquecimento das ligações intergranulares. Nota-se também que a absorção em materiais com predominância cimentícia tende a ser menor que em materiais de origem cerâmica, devido a menor porosidade nos primeiros (LIMA, 1999).

Para agregados reciclados a serem utilizados em pavimentação a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) não determina limites para a absorção, este requisito só deve ser atingido quando a finalidade for a confecção de concretos não estruturais. No entanto, nos ensaios de compactação (item 2.6.2.1), verifica-se que a maior absorção de água dos agregados reciclados, devido a maior porosidade e quantidade de finos, confere ao material um teor de umidade ótima superior ao teor encontrado para agregados naturais (LEITE, 2007).

2.6.1.6 Reação pozolânica

A pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que finamente moído e na presença de água reage com hidróxido de cálcio e forma compostos com propriedades cimentícias, a esta reação é dado o nome de reação pozolânica (Morales, 1994 *apud* Motta, 2005). Motta (2005) indica que para um material ser considerado pozolana, ele deve apresentar consumo de pelo menos 330 mg de óxido de cálcio por meio de ensaios específicos. Em seus estudos, a autora (Motta, 2005) encontrou valores entre 72 e 139 mg para agregados reciclados, ou seja, abaixo do valor mínimo. No entanto, este valor mínimo é definido para concretos que exigem uma resistência muito maior que o empregado em pavimentos, desta forma, apesar de baixa, a atividade pozolânica presente nos agregados reciclados garante um incremento na capacidade de suporte destes materiais.

2.6.2 Resistência mecânica

2.6.2.1 Compactação

Segundo Pinto (2006), a compactação de solos é um método de melhoria e estabilização do solo por meio de processo manual ou mecânico, visando reduzir o número de vazios no solo. Em síntese, a compactação tem em vista dois aspectos: aumentar o contato entre os grãos e tornar a camada de material mais homogênea, melhorando suas características de resistência, deformabilidade e permeabilidade.

A compactação é função de 4 variáveis:

- i) Peso específico seco;
- ii) Umidade;
- iii) Energia de compactação;
- iv) Tipo de material.

O peso específico varia em função da umidade, isto porque quando a umidade é baixa, o atrito entre os grãos é alto e não se consegue uma redução de vazios, mas conforme a quantidade de água aumenta, a lubrificação entre os grãos favorece o deslizamento entre eles e, conseqüentemente, uma maior coesão. No entanto, a água em excesso provoca instabilidade na matéria devido à super lubrificação dos grãos.

A energia de compactação é traduzida em campo pela quantidade de vezes que o rolo compactador ou outro equipamento é passado sobre uma camada de material, e, em laboratório, é compreendida pelo número de golpes em cada camada do corpo de prova que está sendo estudado. A NBR n° 7.182 (ABNT, 1986) determina três tipos de energia de compactação: normal, intermediária e modificada (Quadro 7).

Segundo Lima (2013), para cada energia de compactação aplicada, um certo teor de umidade conduz a uma massa específica máxima, esse teor de umidade é chamado de umidade ótima. Além disso, com o aumento da energia de compactação, existe a tendência de se encontrar uma umidade ótima menor. Por exemplo, para um mesmo tipo de solo, a energia intermediária (26 golpes) pode apresentar como teor de umidade ótima o valor de 13%, no entanto, para este mesmo solo compactado com energia modificada (55 golpes) esse valor pode cair para 8%. Ao se atingir a umidade ótima, o aumento da energia de compactação tem pouco efeito, pois não consegue expelir o ar dos vazios.

QUADRO 7 – ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno ⁽¹⁾	Soquete	Pequeno ⁽²⁾	Grande ⁽²⁾	Grande ⁽²⁾
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
	Dimensões do cilindro	Diâmetro interno: 100 ± 0,4 mm; altura: 127,3 ± 0,3 mm; volume útil: 1000 ± 10 cm ³		
Grande	Soquete	Grande ⁽²⁾	Grande ⁽²⁾	Grande ⁽²⁾
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5
	Dimensões do cilindro	Diâmetro interno: 152,4 ± 0,6 mm; altura: 177,6 ± 0,3 mm (com disco espaçador); volume útil: 2085 ± 22 cm ³		

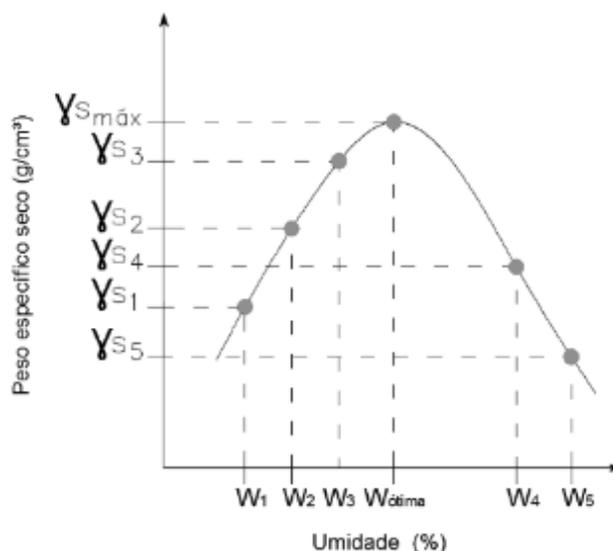
FONTE: ABNT (1986). ⁽¹⁾O cilindro pequeno só pode ser usado quando a amostra, após a preparação passa integralmente na peneira 4,8 mm. ⁽²⁾O soquete pequeno deve ter massa igual a 2500 ± 10 g e altura de queda de 305 ± 2 mm e o soquete grande massa igual 4536 ± 10 g e altura de queda de 457 ± 2 mm.

As amostras para o ensaio de compactação devem ser preparadas de acordo com a norma NBR n° 6.457 (ABNT, 2016). Esta norma tem restrições quanto à granulometria do material utilizado, que deve ser de no máximo 19,1 mm. Caso a amostra contenha grãos maiores que o determinado deverá ser efetuada a sua substituição por grãos menores.

O ensaio de compactação, segundo a norma NBR n° 7.182 (ABNT, 1986), pode ser realizado com ou sem reuso do material, com ou sem secagem prévia do material e tendo como resultado final uma curva de compactação. Esta curva é construída com a variação da umidade e o respectivo peso específico seco. É recomendada a construção de 5 corpos de prova que forneçam 5 pontos para o traçado da curva: dois no ramo seco (abaixo da umidade ótima), um próximo da umidade ótima (também no ramo seco) e dois no ramo úmido (acima da umidade ótima). A “união” dos pontos amostrados fornece a curva de compactação pela qual é possível determinar a umidade ótima, ou seja, a umidade relacionada ao peso

específico seco máximo (ABNT, 1986). A figura 4 exemplifica uma curva de compactação.

FIGURA 4 – EXEMPLO DE CURVA DE COMPACTAÇÃO PARA DETERMINADA ENERGIA



FONTE: Adaptado de NBR n° 7.182 (ABNT, 1986)

Segundo Leite (2007), uma energia de compactação modificada (55 golpes) indica maior quebra dos grãos durante a execução da camada do pavimento, isso significa menor degradação durante a vida útil do pavimento.

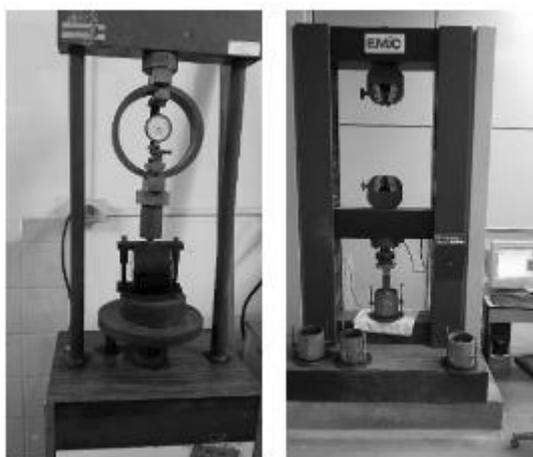
2.6.2.2 CBR e expansão

O Índice de Suporte Califórnia (ISC), ou no inglês *California Bearing Ratio* (CBR), é um ensaio que visa simular em laboratório as condições de umidade, massa específica após compactação e carregamento que ocorrem no campo (BALBO, 2007). Embora não seja o único ensaio para prever o comportamento de solos e agregados, é amplamente utilizado para a análise de resistência de materiais granulares para pavimentos (MOTTA, 2005) e um dos requisitos constantes na NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b), o qual deve ser considerado na análise de agregados reciclados.

O ensaio para medir o CBR é realizado pela NBR n° 9.895 (ABNT, 1987), em que cada corpo de prova deve ser submetido a um carregamento pré-determinado que fornecerá uma tensão. Esta tensão é comparada com a pressão padrão da brita graduada, e o valor desta comparação classificará o material como apto ou não para

ser utilizado nas camadas de base dos pavimentos. A Figura 5 mostra duas prensas utilizadas para o ensaio de CBR, uma com leitura manual e outra com leitura automática. A norma NBR nº 9.895 (ABNT, 1987) também fornece as diretrizes para execução do ensaio de expansão. Neste ensaio, antes de serem rompidos na prensa, os corpos de prova ficam imersos durante 4 dias em um tanque com água, esta situação representa uma espécie de simulação de saturação extrema do material em campo.

FIGURA 5 – PRENSAS UTILIZADAS PARA LEITURA DO CBR



FONTE: O Autor (2017)

A NBR nº 15.116 (ABNT, 2004b) determina o tipo de energia a ser utilizada nos ensaios e o valor mínimo de CBR a ser atingido em função da finalidade da camada do pavimento (Quadro 8).

QUADRO 8 – RESUMO DOS REQUISITOS DA NBR nº 15.116/2004 EM FUNÇÃO DA CAMADA DO PAVIMENTO

Aplicação	CBR (%)	Expansão (%)	Energia de compactação
Reforço de subleito	≥ 12	≤ 1,0	Normal
Sub-Base e revestimento primário	≥ 20	≤ 1,0	Intermediária
Base ⁽¹⁾	≥ 60	≤ 0,5	Intermediária ou modificada

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

FONTE: Adaptado de ABNT (2004b)

2.6.2.3 Abrasão Los Angeles

Segundo Bernucci et al. (2008), durante o processo de manuseio e execução dos pavimentos, os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão, portanto, devem apresentar habilidade para resistir a quebras, degradação e desintegração. Em um pavimento asfáltico, as maiores tensões são recebidas pelo revestimento devido à ação direta do tráfego. Parte destes esforços recebidos são transferidos para a camada de base e, de esta, conseqüentemente, para a sub-base e assim por diante, até que chegue o mínimo possível de esforços ao subleito, ou seja, os esforços recebidos pelas camadas inferiores são menores que os das camadas superiores. O ensaio de Abrasão Los Angeles, descrito pela norma DNER-ME 035 (DNER, 1998a), é o mais utilizado para medir a quebra dos grãos e consiste em avaliar a massa da amostra antes e depois de ser colocada em um moinho que gira com uma determinada rotação, com esferas de aço. Embora a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) não considere este requisito como parâmetro de avaliação de agregados reciclados, a Prefeitura de Curitiba determina que este valor deve ser menor que 50% (CURITIBA, 2015).

2.7 PAVIMENTO URBANO

Segundo Balbo (2007), o pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, e adequado para atender estrutural e operacionalmente o tráfego de maneira durável e mínimo custo possível, considerando diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação obrigatórios.

Segundo o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), os pavimentos podem ser classificados como: flexível, semirrígido e rígido (Quadro 9) (DNIT, 2006) e estão ilustrados na Figura 6.

A seção transversal de um pavimento pode variar de acordo com sua classificação. Ela é constituída de um revestimento, uma base e uma sub-base assentada sob o leito natural ou reforçado da via (Figura 7). As espessuras das camadas variam de acordo com a capacidade do subleito, do material empregado e do tipo de tráfego que circulará na via. Esta capacidade é representada pelo Índice de Suporte Califórnia (CBR ou ISC) e foi descrito no item 2.6.2.2.

QUADRO 9 – TIPOS DE PAVIMENTO

Tipo	Descrição
Flexível	Aquele no qual todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica.
Semirrígido	Caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como, por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.
Rígido	Aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Exemplo típico: pavimento constituído por lajes de cimento Portland.

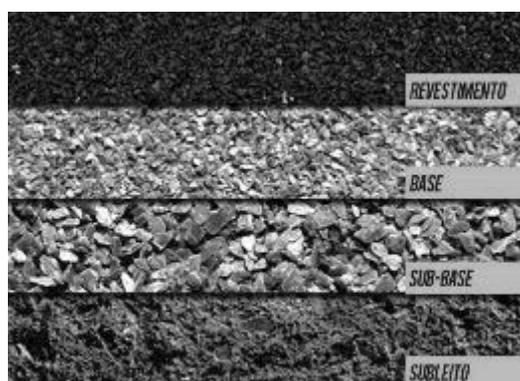
FONTE: DNIT (2006)

FIGURA 6 – PAVIMENTO FLEXÍVEL(a), DE BASE SEMIRRÍGIDA(b) E RÍGIDO(c)



FONTE: O autor (2017); Google Maps (2017)

FIGURA 7 – COMPOSIÇÃO TÍPICA DAS CAMADAS DE UM PAVIMENTO



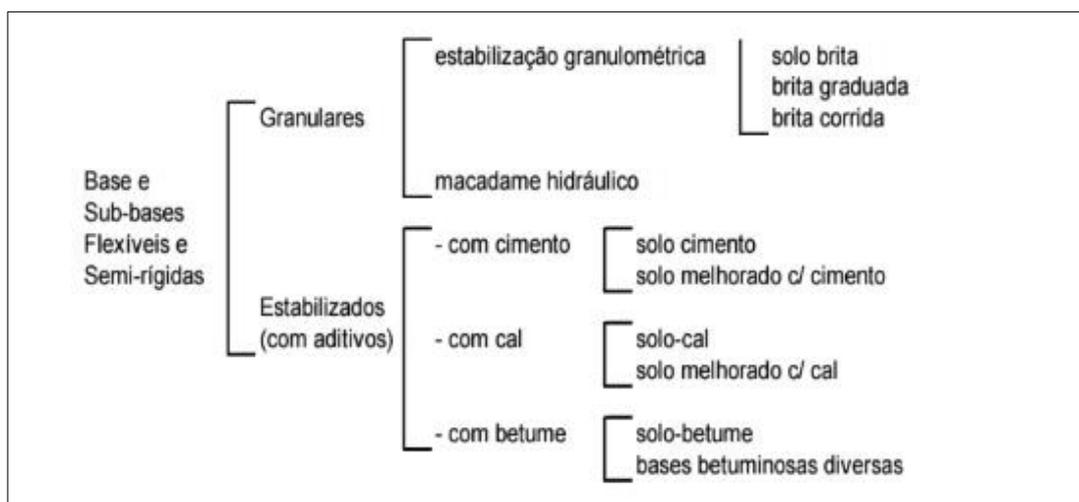
FONTE: Flatout (2017)

2.7.1 Materiais empregados em base de pavimentos

A principal função das camadas que compõe a base do pavimento é receber os esforços não dissipados pela camada de revestimento e transferir o mínimo possível de esforços para o subleito. Por questões econômicas, quando esta camada é muito espessa, pode ser dividida em base e sub-base, sendo que a última geralmente tem custos menores (BALBO, 2007). As bases e sub-bases podem ser classificadas como flexíveis e semirrígidas e divididas em granulares e estabilizadas (Figura 8).

A constituição destas camadas é basicamente granular, podendo ser utilizado solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada (tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos, etc) e materiais reciclados de outros processos, como resíduos da construção civil ou escória de aciaria (BALBO, 2007). Estudos realizados por Imteaz et al. (2012), na Austrália, indicaram sucesso na incorporação de vidros para compor sub-bases de pavimentos. Edinçliler et al. (2004) estudou com sucesso a utilização de pneu triturado e cinzas volantes de centrais térmicas para construção de bases de pavimentos na Turquia.

FIGURA 8 – TIPOS DE BASES E SUB-BASES E SUAS COMPOSIÇÕES



FONTE: DNIT (2006)

Um exemplo do tipo e nomenclatura (Quadro 10) do material de base e sub-base utilizado em pavimentos é o considerado em obras da Prefeitura Municipal de

Curitiba (CURITIBA, 2015). Estes agregados são diferenciados pela origem e pelo diâmetro máximo característico (DMC) apresentado no item 2.6.1.2.

QUADRO 10 - NOMENCLATURA DOS MATERIAIS UTILIZADOS COMO BASE E SUB-BASE DE ACORDO COM O TERMO DE REFERÊNCIA DA PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA

Material	Origem	Uso	DMC
Brita 4A	Britagem de jazidas naturais	Sub-base	87,5 mm
Brita 4A reciclada de concreto	RCD com composição predominantemente cimentícia (concretos e argamassas)		
Brita 4A reciclada mista	RCD com composição mista de materiais cerâmicos (tijolos, telhas, etc.) e cimentícios (concretos e argamassas)		
Brita graduada	Britagem de jazidas naturais	Base	25 mm
Brita graduada reciclada de concreto	RCD com composição predominantemente cimentícia (concretos e argamassas)		
Brita graduada mista	RCD com composição mista de materiais cerâmicos (tijolos, telhas, etc.) e cimentícios (concretos e argamassas)		

FONTE: Adaptado de Curitiba (2015)

2.7.2 Dimensionamento de pavimentos

Segundo Balbo (2007), dimensionar um pavimento significa determinar espessuras de camadas e os tipos de materiais a serem utilizados em sua construção, de modo a conceber uma estrutura capaz de suportar um volume de tráfego preestabelecido, nas condições climáticas locais, oferecendo o desempenho desejável para suas funções.

Existem diversos métodos de dimensionamento de pavimentos, devido as diversas condições ambientais, geológicas, pedológicas e de tráfego, além de diferentes opiniões entre os técnicos (BALBO, 2007). Geralmente, três tipos de métodos são adotados no dimensionamento de pavimentos:

a) Método empírico: fruto da modelagem estatística da evolução de parâmetros físicos observados nos pavimentos em serviço;

b) Método semiempírico: fruto da extrapolação e expansão de resultados empíricos com base em uma teoria analítica consistente;

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

Destaca-se que o método semiempírico de dimensionamento do extinto DNER (DNER, 1981) é o mais popular entre os técnicos da área de pavimentação (BALBO, 2007).

2.7.2.1 Método do extinto DNER

Desenvolvido pelo engenheiro Murilo Lopes Souza, em meados de 1960, o método do extinto DNER teve sua última atualização em 1981 (BALBO, 2007). Consiste numa variação do método CBR (*California Bearing Ratio*), um método empírico desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos. O CBR exprime uma porcentagem da resistência à penetração de dado material tido como valor de referência (item 2.6.2.2).

Segundo Balbo (2007), por ser baseado no critério do CBR, este método apresenta como modo de ruptura o acúmulo de deformações plásticas causado pelos esforços de deformações que ocorrem no subleito e nas demais camadas granulares do pavimento ao longo do período de projeto. Aspectos relacionados à fadiga de misturas asfálticas e de bases cimentadas não são consideradas nem implicitamente. Além disso, por representar uma extrapolação de um método empírico, é considerado semiempírico. Para o dimensionamento do pavimento são considerados três critérios: o volume de tráfego da via, a capacidade de suporte do subleito e o tipo de material empregado.

2.7.2.2 Método da Prefeitura Municipal de São Paulo

Visando substituir as normas existentes desde os anos de 1960, a partir de 2002, um corpo técnico de engenheiros foi reunido para elaborar e fixar normas oficiais para projetos e análise estrutural de pavimentos na cidade de São Paulo, resultando em duas instruções de projeto (IP) publicadas no ano de 2004: a IP-04/2004 (PMSP, 2004b) (Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Leve e Médio) e a IP-05/2004 (Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Meio Pesado, Pesado, Muito Pesado e Faixa Exclusiva de Ônibus) (BALBO, 2007).

As normas especificam o dimensionamento baseado no critério do CBR, mas abrem espaço para o emprego de outros materiais, incluindo agregados reciclados da construção e demolição (BALBO, 2007). A Prefeitura de São Paulo disponibiliza uma planilha de cálculo conhecida como *DimPav* (PMSP, 2004c). A principal vantagem desta planilha, elaborada para o uso em Excel, é que o preenchimento dos campos fornece o dimensionamento automático das camadas do pavimento, evitando trabalhos morosos com cálculos, o que ocorria no método do extinto DNER.

2.7.3 Tratamento superficial betuminoso (TSB)

Os tratamentos superficiais são revestimentos delgados constituídos por asfalto e agregados, executados sobre a base ou sobre o revestimento existente de um pavimento, não sendo utilizados processos de usinagem em sua execução. Os materiais asfálticos utilizados são os CAPs (cimento asfáltico de petróleo), os asfaltos diluídos e as emulsões asfálticas (BALBO, 2007)

Os tratamentos superficiais betuminosos são empregados em larga escala nas cidades brasileiras, pois tem baixo custo e eliminam o pó e a lama característicos de vias com revestimento primário (terra ou saibro). No entanto, apesar do baixo custo, sua aplicação está limitada às vias de tráfego leve, com pouca declividade e que apresentem no mínimo alguns dispositivos de drenagem (caixas de captação, travessias, meio fio, etc.), pois a fina camada construída não é capaz de resistir às grandes solicitações de esforços.

Os tratamentos superficiais podem ser simples (uma camada de ligante asfáltico), duplos (duas camadas) ou triplos (três camadas), quanto mais camadas de ligante asfáltico, maior resistência terá o revestimento, a base estará mais impermeabilizada e maior será o custo de execução. Neste caso, a quantidade de ligante asfáltico a ser utilizado pode inviabilizar a técnica (DNIT, 2006).

2.7.4 Manutenção de pavimentos urbanos

Eventualmente, alguns pontos do pavimento podem apresentar problemas ao longo do tempo. Estes problemas podem ser superficiais, como o desgaste do revestimento por envelhecimento e oxidação dos seus componentes ou então

problemas estruturais, que são identificados por deformações plásticas ou retrações no pavimento, conhecidas como “borrachudo” ou “costa de jacaré” (Figura 9), geralmente relacionadas com baixa capacidade de suporte, espessura insuficiente das camadas (base, sub-base e subleito) ou tráfego incompatível com a via, e neste caso, é preciso realizar a recuperação das camadas inferiores do pavimento (DNIT, 2006).

FIGURA 9 – OCORRÊNCIA DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA (BORRACHUDO) NO PAVIMENTO



FONTE: O autor (2017). Referência caneta com 14,5 cm de comprimento

O pavimento também pode necessitar de reparos devido às intervenções que são executadas nos pavimentos, que diminuem sua capacidade de suporte, como obras de drenagem ou redes coletoras de esgoto. Para execução do reforço é necessário delimitar a área danificada, cortar o pavimento, remover a camada de base frágil e recompor as camadas com materiais de qualidade e com espessura suficiente para garantir que resistirão aos esforços transmitidos pelo tráfego. Após a execução do reforço da base, aplica-se o revestimento, geralmente em Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) (DNIT, 2006). A Prefeitura de Curitiba utiliza materiais como a brita 4A e brita graduada (materiais apresentados no Quadro 10) para recompor as camadas de base.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PRODUTORES DE AGREGADOS RECICLADOS NA REGIÃO DE CURITIBA

Os produtores de agregados reciclados da região de Curitiba foram localizados a partir de pesquisa na internet e na base de dados da Prefeitura Municipal de Curitiba. Após contato, as empresas que se propuseram a colaborar com o trabalho receberam visitas nas usinas de reciclagem ao longo do ano de 2016. O objetivo das visitas foi identificar os fornecedores de resíduos para beneficiamento, os tipos de resíduos da construção civil comercializados, a capacidade de produção, os custos de aquisição dos materiais, e a situação atual do mercado de agregados reciclados.

3.2 AVALIAÇÃO PRELIMINAR DOS AGREGADOS RECICLADOS EM PAVIMENTOS

Os agregados reciclados de concreto (ARC) foram empregados nesta pesquisa como reforço de base e pequenos complementos de pavimento, base de ciclovia, capa selante para tratamento superficial betuminoso (TSB) e em vias de revestimento primário (saibro). As análises realizadas nestes trechos foram empíricas, limitando-se às análises observadas durante a execução e inspeção visual nos trechos executados. A construção destes trechos foi realizada com base nos conhecimentos práticos dos técnicos da Prefeitura.

Durante a execução foram registrados os seguintes dados: localização, data, condições climáticas, tipo de tráfego, duração dos serviços, dimensões dos trechos (largura, extensão e profundidade), equipamentos utilizados e classificação dos agregados utilizados. A inspeção visual para verificar o comportamento dos trechos em relação à apresentação de deformações plásticas como “borrachudos”, retrações (trincas e fissuras) e desgaste superficial (no caso da utilização como revestimento primário e tratamento superficial betuminoso) foram realizadas de forma periódica, mas sem intervalo de tempo definido. Cada trecho construído foi monitorado com visitas no mínimo bimestrais e análise visual simplificada da superfície do pavimento, não sendo aplicado nenhum equipamento ou outro tipo de teste para análise.

a) Reforço de base e pequeno complemento de pavimento

As camadas de base foram compactadas com no mínimo 10 cm e no máximo 20 cm de espessura, conforme a exigência da norma DNIT nº 141/2010 (DNIT, 2010c). Os agregados naturais geralmente utilizados nestes casos (brita 4A e a brita graduada) foram substituídos ou utilizados em conjunto com os agregados reciclados de concreto (brita 4A reciclada de concreto e brita graduada reciclada de concreto (Quadro 10). Foram construídos três trechos, descritos a seguir. As execuções dos trechos não foram simultâneas e por este motivo a análise do desempenho não teve a mesma periodicidade. Foram utilizados os equipamentos das equipes que realizam a manutenção da malha viária na Regional do Bairro Novo, por meio do Distrito de Manutenção Urbana do Bairro Novo.

- Trecho 01: Construído devido às obras de drenagem que danificaram o pavimento. As dimensões previstas do trecho foram: 10 m de comprimento, 3 m de largura e 35 cm de profundidade, sendo 20 cm preenchidos e compactados com brita 4A reciclada de concreto (sub-base) e 10 cm preenchidos e compactados com brita graduada reciclada de concreto (base), além de 5 cm de revestimento com CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) compactado.

- Trecho 02: Complemento de pavimento após obras de ampliação da rede de drenagem. O trecho tinha como dimensões: 25 m de comprimento, 1 m de largura e 25 cm de profundidade, sendo 20 cm preenchidos com brita graduada reciclada de concreto (base) e 5 cm de revestimento de CBUQ compactado.

- Trecho 03: Recuperação de pavimento deformado que apresentava problemas estruturais de base com deformação plástica do pavimento (borrachudo). A dimensão do trecho de intervenção foi: 20 m de comprimento, 7 m de largura e 30 cm de profundidade. Foram empregados para recuperação do trecho: brita 4A natural como material de sub-base, com espessura de 15 cm; brita graduada natural, em uma metade da via, com espessura de 10 cm e largura de 3,5 m e, na outra metade, brita graduada reciclada de concreto com espessura de 10 cm e largura de 3,5 m. O revestimento foi executado em CBUQ com uma espessura compactada de 5 cm. As espessuras foram adotadas com base na resistência do sub-leito disponível por levantamento anterior a este estudo.

b) Base de calçada alternativa em CBUQ

No município de Curitiba, a Lei nº 11.095/2004 (CURITIBA, 2004) estabelece que os passeios devem ser executados pelos proprietários dos imóveis e o Decreto nº 1.066/2006 (CURITIBA, 2006) estabelece os padrões das calçadas a serem adotados na cidade: lajota de concreto, bloco de concreto ou CBUQ. As calçadas executadas em CBUQ são popularmente chamadas de ciclovias, que podem ser construídas sem emendas e garantem aos pedestres e ciclistas facilidade de deslocamento. O volume e o peso de tráfego nas ciclovias são extremamente menores quando comparados a uma via rodoviária; por este motivo, são construídas com camadas menos espessas e, possivelmente, com materiais alternativos. Para avaliar o comportamento dos agregados reciclados, nesta possibilidade, foi construído um trecho com extensão de 300 m por 1,5 m de largura. Devido ao tráfego mais baixo, foi adotada a espessura padrão utilizada pela Prefeitura de Curitiba, tendo a camada de base 10 cm de brita graduada reciclada de concreto e 3 cm para o revestimento de CBUQ compactado.

c) Tratamento superficial betuminoso (TSB)

O agregado reciclado de concreto (ARC) foi utilizado com fins de avaliar seu comportamento como capa selante de um tratamento superficial betuminoso (TSB) duplo. O trecho construído com 40 metros de comprimento por 7 metros de largura foi assentado sobre uma base existente de material fresado, o qual é constituído pelo asfalto envelhecido retirado do pavimento com auxílio da máquina fresadora e apresenta granulometria similar a brita graduada.

A análise deste trecho está relacionada à necessidade de avaliar uma alternativa para vias que apresentam revestimento de material fresado ou revestimento primário (saibro), estes dois tipos de revestimento geram pó quando o tempo está seco e podem gerar complicações respiratórias na população. Com a aplicação de uma capa selante este problema tende a acabar ou diminuir, apesar de

ser uma solução de baixo custo tem vida útil mais curta que um pavimento executado com base de agregados e revestimento asfáltico de CBUQ.

As etapas de construção foram as seguintes: após o nivelamento da base existente, ela recebeu uma camada de emulsão ⁽¹⁾ de ruptura média (RM); em seguida, foi aplicada uma fina camada de agregado reciclado de concreto, classificado como brita graduada, com espessura de 2,5 cm e compactada com rolo compactador liso; concluída a compactação, uma nova camada de emulsão RM foi aplicada e em seguida foi distribuída sobre ela uma mistura de pó de pedra e pedrisco (agregados naturais com granulometria máxima de 4,8 mm) com espessura de 0,5 cm; e, para finalizar, o rolo compactador liso foi utilizado novamente para selar o revestimento. A taxa de aplicação do ligante asfáltico nas duas camadas foi de 1,5 l/m².

As técnicas de execução foram baseadas na norma DNIT n° 147/2012 (DNIT, 2012), mas ocorreram variações dos materiais utilizados, pois a norma considera o uso de agregados uniformes como a brita 01 (agregado com granulometria uniforme de no máximo 19 mm) e emulsão de ruptura rápida (RR) ou cimento asfáltico de petróleo (CAP). Ocorreu a utilização do RM, ao invés da RR ou do CAP, devido à disponibilidade do material no momento dos testes. O trecho foi monitorado quinzenalmente e foram anotados dados de precipitação e variação na superfície no período avaliado.

d) Via de revestimento primário

As vias de revestimento primário caracterizam-se por serem revestidas com saibro (material resultante da decomposição química de granitos ou gnaisses com tamanho de areia à cascalho). Uma das possíveis aplicações dos agregados reciclados é em vias deste tipo (ABNT, 2004a). A aplicação do material foi realizada em um trecho experimental com 20 m de comprimento, 5 m de largura e 15 cm de espessura construído com saibro reciclado de concreto.

⁽¹⁾ Emulsões asfáltica são dispersões compostas de uma fase sólida em outra fase líquida. São produzidas a partir de CAP (ou de asfaltos diluídos), adicionados a água e agente emulsificante em pequenas proporções (0,2 a 1%). A velocidade de ruptura de uma emulsão é influenciada por fatores como quantidade de emulsificante, quantidade e viscosidade de asfaltos, superfície específica dos agregados, temperatura de aplicação, umidade e temperatura dos agregados, sendo classificada como de ruptura rápida (RR), média (RM) ou lenta (RL) (BALBO, 2007).

3.3 CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DOS AGREGADOS RECICLADOS

O item 3.2 tratou de diversos empregos dos agregados reciclados sem considerar uma análise mais criteriosa dos materiais por meio de ensaios laboratoriais. Esta etapa do trabalho visou realizar a caracterização laboratorial dos agregados reciclados oriundos de RCD produzidos na região de Curitiba. Os ensaios foram realizados nos laboratórios da Secretaria Municipal de Obras Públicas de Curitiba (SMOP) e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), contemplando os dois tipos existentes de acordo com a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) (Quadro 11). As amostras foram coletadas de acordo com a norma DNER n° 120 (DNER, 1997b).

QUADRO 11 – TIPOS DE AGREGADOS RECICLADOS ESTUDADOS

Tipo	Composição
ARC (Agregado reciclado de concreto)	Composto na sua fração graúda ($\varnothing > 4,8$ mm), de no mínimo 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland e rochas.
ARM (Agregado reciclado misto)	Composto na sua fração graúda ($\varnothing > 4,8$ mm), com menos de 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland e rochas. Destaca-se neste tipo de material, a presença de cerâmica.

FONTE: ABNT (2004b)

Além da composição, os materiais foram diferenciados de acordo com suas características granulométricas, resistência à abrasão e capacidade de suporte para emprego em camadas do pavimento. Resultados encontrados por outros autores que já estudaram os agregados reciclados e valores apresentados nas normas brasileiras serviram como parâmetro de comparação aos resultados encontrados. Os ensaios laboratoriais foram divididos em ensaios de caracterização geral e ensaios mecânicos e de estabilidade dos agregados reciclados.

3.3.1 Caracterização geral

Os ensaios de composição, análise granulométrica, índice de forma, equivalência de areia e massa unitária fazem parte da caracterização geral dos

agregados reciclados. Os três primeiros ensaios foram executados segundo a norma a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) e outras normas relacionadas (Quadro 12). Não houve alteração entre os ensaios realizados e o estipulado nestas normas. O ensaio de equivalência de areia foi realizado para avaliar a quantidade de argila presente nos agregados e o de massa unitária para controle de recebimento dos materiais no campo, uma vez que relaciona massa e volume do material no estado solto. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de solos da SMOP. As normas com liberação de publicação estão anexadas no final deste estudo.

QUADRO 12 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DE ACORDO COM AS NORMAS PARA AVALIAR AS DIVERSAS PROPRIEDADES

Ensaio	Normas relacionadas	Objetivo
Composição e contaminantes	NBR 15116 /2004 – Anexos A	Identificar qual tipo de agregado está sendo trabalhado: ARC ou ARM
Análise granulométrica (curva granulométrica, DMC, coeficiente de uniformidade, teor passante na peneira 0,42 mm)	DNIT 083/1998 NBR 15116/2004 DNIT 141/2010 DNIT 139/2010 PMC ES-021/1999	Caracterizar e enquadrar a amostra em uma faixa granulométrica existente para identificar o agregado (brita graduada, brita 4A, saibro, etc.)
Índice de forma	NBR 7809/2005 NBR 15116/2004	Verificar se a relação entre as dimensões dos agregados é capacidade de fornecer travamento satisfatório entre os grãos.
Equivalente de areia	DNER 054/1997	Avaliar a quantidade de argila presente no material
Massa unitária em estado solto	DNER-ME 152/1995	Relacionar o peso do material com o seu volume

FONTE: O Autor (2017)

3.3.2 Ensaio mecânicos e de estabilidade

Para avaliar a capacidade mecânica dos agregados foram realizados os ensaios de abrasão Los Angeles, compactação, CBR e expansão. Foram utilizados os requisitos de normas já existentes (Quadro 13).

QUADRO 13 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DOS AGREGADOS DE ACORDO COM AS RESPECTIVAS NORMAS

Ensaio	Normas relacionadas	Objetivo
Abrasão Los Angeles	DNER 035/1998	Determinar o índice de quebra dos grãos.
Compactação (sem reuso de material)	NBR 7.182/1986 NBR 15.116/2004 NBR 6.457/2016	Determinar a massa específica aparente seca e a umidade ótima para trabalhar com o material. Não houve reuso de material e a energia utilizada foi a intermediária (26 golpes). Foram moldados 5 corpos de prova para cada tipo de material (ARM e ARC)
Expansão e Índice de Suporte (CBR)	NBR 9.895/1987	Determinar a expansão do material quando imerso em água por 4 dias e a capacidade de suporte visando verificar em qual camada do pavimento pode ser utilizado.

FONTE: O Autor (2017)

A preparação das amostras para os ensaios de compactação seguiu a NBR n° 6.457 (ABNT, 2016) e o ensaio de compactação foi executado de acordo com a NBR n° 7.182 (ABNT,1986) sem reutilizar o material e com sua secagem prévia, utilização do soquete e do cilindro grande (Quadro 07, p. 43), e cinco camadas de compactação para cada corpo de prova. Destaca-se que as amostras não foram lavadas para remoção de partículas muito finas aderidas nas partículas graúdas, devido ao fato de que estas partículas muito finas não representaram uma massa significativa quando comparado à amostra total; além de que esta lavagem também não é executada nas usinas de reciclagem por demandar recursos hídricos e eletricidade, aumentando os custos de produção.

3.3.2.1 Determinação padrão do ponto de ótimo de compactação para energia intermediária

Inicialmente, foi determinada a Curva de Compactação (Figura 4), relacionando massa específica em função da variação da umidade. Esta curva é determinada de acordo com a NBR n° 7.182 (ABNT,1986). A energia utilizada foi a intermediária (26 golpes), uma vez que a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) estabelece

que esta energia é adequada para verificar a aplicabilidade do material em bases e sub-bases de pavimentos. Além da energia intermediária, a norma também prevê o uso de energia modificada (55 golpes) para a determinação do ponto ótimo de compactação em laboratório para materiais de base e da energia normal (12 golpes) para materiais a serem utilizados em reforço de subleito. Para este ensaio foram moldados 5 corpos de prova, conforme preconiza a NBR n° 7.182 (ABNT, 1986), tanto para o agregado reciclado de concreto quanto para o agregado reciclado misto.

3.3.2.2 Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) e expansão

Com os corpos de prova moldados no item 3.3.2.1 foram avaliadas suas respectivas resistência mecânica e expansão. A norma utilizada para estes ensaios foi a NBR n° 9.895 (ABNT, 1987). Para o ponto de umidade ótima foram moldados mais dois corpos de prova, também com a energia intermediária (26 golpes) para cada tipo de material (ARC e ARM), com a finalidade de fornecer uma triplicata de resultados (1 do primeiro ensaio e mais 2 de repetição) e, desta forma, ampliar a base de dados para análise (média e desvio padrão). A utilização dos materiais como base ou sub-base de pavimentos está condicionada aos resultados de CBR e expansão da NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b), que foram apresentados no item 2.6.2.2 (Quadro 8).

3.3.2.3 Planejamento fatorial de experimento com composto central para avaliar a umidade e energia de compactação

Além da determinação do ponto ótimo de compactação para a energia intermediária, foi realizado um planejamento fatorial de experimento com composto central (Figura 10) para avaliar o efeito da energia (representada pelo número de golpes) e da umidade utilizada no ensaio na resistência mecânica (CBR) e expansão do material. Este método foi utilizado pela otimização do processo, redução do tempo e minimização de custos (MATTIETO e MATTA, 2012). Além disso, é um método que tem sido utilizado com grande sucesso em diversos processos industriais (BARROS NETO et al., 2001).

O objetivo deste experimento foi encontrar, além de um ponto ótimo de compactação, uma área da superfície de resposta onde umidade e energia de

compactação fossem capazes de atender aos dois requisitos estipulados em norma. O primeiro é o Índice de Suporte Califórnia (CBR), que para emprego em base de pavimentos de tráfego baixo ou médio ($N < 10^6$) deve ser superior a 60%, e para tráfegos mais pesados, superior a 80%. Para sub-bases este valor deve ser superior a 20%, independente do tráfego.

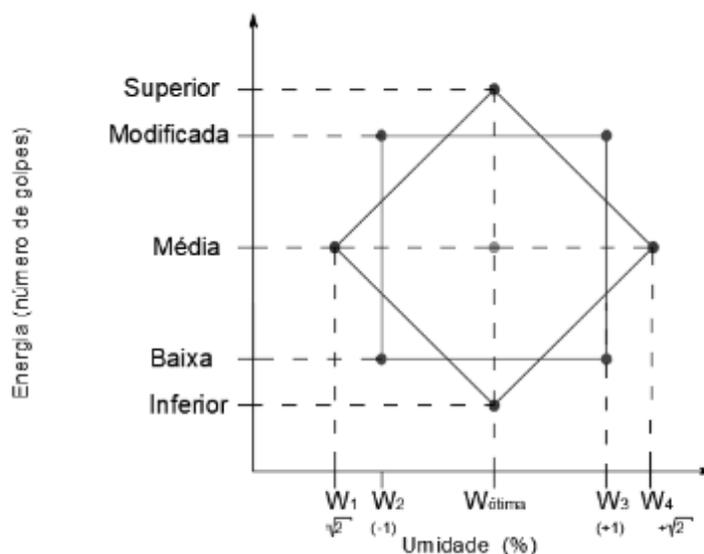
O outro requisito é a expansão, que para bases deve ser inferior a 0,5% e para sub-bases inferior a 1,0% (ABNT, 2004b). Ao localizar esta área, de acordo com os requisitos, é possível diminuir a necessidade de correção das umidades dos materiais em campo, o que não ocorre quando é considerado apenas o planejamento univariado, no qual apenas um ponto representa a umidade ideal.

A correção da umidade em campo é uma atividade que demanda tempo e mais equipamentos, como caminhão tanque (aumentar a umidade) ou escarificador (diminuir a umidade). Com este tipo de experimento, existiria mais de uma possibilidade de atingir os requisitos de norma, uma vez que conhecida a umidade, seria necessário trabalhar com a energia de compactação caracterizada em campo pela variação do número de passadas do rolo compactador.

No geral, umidade e energia de compactação são inversamente proporcionais (LEITE, 2007), ou seja, uma umidade mais baixa requer uma energia de compactação maior. Contudo, esta relação é limitada e no ponto ótimo de compactação a aplicação de energia elevada não se traduz em melhores resultados. As moldagens dos corpos de prova foram executadas com os mesmos materiais e equipamentos relacionados nas NBR n° 7.182 (ABNT, 1986) e NBR n° 6.457 (ABNT, 2016). A única variação é que foram utilizados outros valores de energia de compactação além dos tradicionais previstos em norma (Figura 10):

- Energia baixa, com 13 golpes;
- Energia Modificada, com 55 golpes;
- Energia média, representa o ponto central (energia de 34 golpes ou média aritmética entre o número de golpes da energia baixa e modificada);
- Energia inferior, representada pela variação $-\sqrt{2}$ a partir da energia média, com 4 golpes;
- Energia superior, representada pela variação $+\sqrt{2}$ a partir da energia média, com 64 golpes.

FIGURA 10 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DO CBR E EXPANSÃO



FONTE: O Autor (2017). Observação: Os pontos verdes correspondem ao planejamento fatorial, os azuis aos pontos axiais e o ponto rosa ao ponto central (planejamento em estrela com triplicata do ponto central).

A variação da umidade no planejamento de experimento unifatorial foi estabelecida após estudo da curva de compactação para a energia intermediária (item 3.3.2.1), que determina a umidade ótima ($W_{ótima}$) de trabalho (Figura 4). Os valores encontrados para expansão e CBR (Tabela 2) serão apresentados na seção 4 (Resultados e Discussões). Devido à disponibilidade de material, este planejamento foi realizado apenas para os agregados reciclados de concreto (ARC).

Outro ponto a ser considerado é a dificuldade em repetir os ensaios e acertar exatamente o teor de umidade dos corpos de prova, desta forma, foi fixado como padrão uma variação de até $\pm 1,5\%$ no teor para a referida umidade. Por exemplo, caso a umidade $W_{ótima}$ seja de 10%, serão válidos valores entre 8,5 e 11,5%, e caso seja encontrado um valor fora desse intervalo, o corpo de prova deverá ser refeito. Este intervalo foi definido para padronizar o ensaio, estando dentro do limite aceitável em campo para variação da umidade ótima de acordo com a norma DNIT nº 141 (DNIT, 2010), mesmo intervalo descrito na NBR nº 15.115 (ABNT, 2004a).

TABELA 2 – EFEITO DA ENERGIA E UMIDADE SOBRE A EXPANSÃO E CBR

Experimento	Energia, codificado	Umidade codificada	Energia, Golpes	Umidade, %
1	-1	-1	Baixa, 13	W ₂
2	1	-1	Modificada, 55	W ₂
3	-1	1	Baixa, 13	W ₃
4	1	1	Modificada, 55	W ₃
5	0	0	Média, 34	W _{ótima}
6	0	0	Média, 34	W _{ótima}
7	0	0	Média, 34	W _{ótima}
8	-1,41	0	Inferior, 4	W _{ótima}
9	1,41	0	Superior, 64	W _{ótima}
10	0	-1,41	Média, 34	W ₁
11	0	1,41	Média, 34	W ₄

FONTE: O Autor (2017).

Os corpos de prova para determinar no Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) foram produzidos segundo a NBR n° 9.895 (ABNT, 1987) e imersos em água por quatro dias para estimar a supersaturação do material com água, o que pode ocorrer em campo. Esta operação é necessária para medir a expansão do corpo de prova saturado e, posteriormente, medir sua capacidade de suporte (CBR), submetendo-o a um carregamento constante por até 10 minutos. Para o planejamento, foram moldados 11 corpos de prova (Tabela 2), com variação da energia de compactação e da umidade. Estes ensaios foram realizados em parceria com os laboratórios de solos da SMOP da UTFPR. O software *Statística* foi utilizado para auxiliar no tratamento dos dados obtidos.

3.4 CONSTRUÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS

Após a caracterização laboratorial revelar se os agregados reciclados oriundos de RCD atendiam os parâmetros exigidos pela NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) e demais normas citadas nos Quadros 12 e 13, como granulometria, composição e capacidade de suporte, pretendia-se construir três trechos de pavimento.

Uma via do município de Curitiba foi selecionada para um estudo mais aprofundado de aplicação, desta vez com controle dos materiais (umidade e

compactação). A escolha desta via considerou um tráfego com número de repetição de carga (N)⁽¹⁾ menor ou igual a 10⁶, fator limitante para o emprego de agregados reciclados conforme estipulado pela NBR n° 15.116/2004 (ABNT, 2004b). Outro requisito era de que a capacidade de suporte do subleito já fosse conhecida, agilizando o processo de dimensionamento e evitando que mais testes fossem realizados em laboratório. O volume de tráfego foi definido de acordo com a norma IP-002 (PMSP, 2004a). Para um volume de tráfego menor ou igual a 10⁶, o método do extinto DNER (DNER, 1981) indica como camada de revestimento do pavimento os tratamentos superficiais betuminosos (TSB). No entanto, optou-se por aplicar uma capa de 5 cm de espessura em CBUQ, um padrão utilizado em vias deste tipo de tráfego na cidade de Curitiba.

Com os dados de tipo de tráfego e capacidade de suporte do subleito, foi possível realizar o dimensionamento do trecho com o método do extinto DNER (DNER, 1981). O Quadro 14 resume os requisitos exigidos para os materiais a serem empregados como base e sub-base de pavimentos.

QUADRO 14 – REQUISITOS DOS MATERIAIS PARA EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO COM BASE NAS ORIENTAÇÕES DO MÉTODO DNER

Material	ISC ou CBR	Expansão
Subleito	-	≤ 2%
Reforço de subleito	Maior que o do subleito	≤ 2%
Sub-base	≥ 20	≤ 1 %
Base	≥ 80 ⁽¹⁾	≤ 0,5 %

FONTE: DNER (1981). ⁽¹⁾ Se a solicitação de tráfego for inferior a 10⁶ o CBR da base pode ser ≥ 60.

A espessura de cada camada do pavimento (H_{eq}) é determinada pela equação 01, em função do número equivalente (N)⁽¹⁾ e da capacidade de suporte (CBR) da camada em questão. Por exemplo, para determinar a espessura da camada H_{20} (camada sobre a sub-base), considera-se o CBR da sub-base e para a camada H_n (camada sobre o reforço do subleito), o valor do CBR do material para reforço subleito e assim por diante.

(1) O número equivalente (N) representa a quantidade de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto, este eixo tem carga de 8,2 ton (18.000 lbs).

$$H_{eq} = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (01)$$

As camadas intermediárias do pavimento são calculadas pela resolução das inequações 02, 03 e 04 (Figura 11). O coeficiente do revestimento (K_R) foi adotado igual 2,0 e os demais coeficientes da base, sub-base e reforço (K_B , K_S , K_{Ref} , respectivamente) igual a 1,0, conforme determina a norma do extinto DNER (DNER, 1981).

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \quad (02)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n \quad (03)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{Ref} \geq H_m \quad (04)$$

FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO DAS ESPESSURAS DAS CAMADAS DE UM PAVIMENTO DIMENSIONADO PELO MÉTODO DO EXTINTO DNER



FONTE: Adaptado de Balbo (2007)

Quando o valor do CBR ou IS da sub-base for superior a 20, a espessura do pavimento necessária para protegê-la é determinada como se este valor fosse 20 e, por esta razão, usam-se sempre os símbolos H_{20} e h_{20} para designar as espessuras de pavimentos sobre a sub-base e da própria sub-base, respectivamente. As siglas B e R , designam as espessuras das camadas de base e revestimento, respectivamente (Figura 11).

A configuração de cada trecho variou devido ao material empregado (Quadro 15). A espessura total de cada trecho manteve-se constante, uma vez que esta determinação ocorre em função da capacidade do subleito e do tráfego local e os materiais empregados devem atender aos requisitos mínimos de resistência (CBR) determinados em laboratório. Segundo a NBR nº 15.116/2004 (ABNT, 2004b), para a sub-base o CBR deve ser superior a 20% e, para a base superior a 60%. A espessura do revestimento asfáltico também foi constante em todos os trechos (5 cm).

QUADRO 15 – CONFIGURAÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

Camada	Trecho 01	Trecho 02	Trecho 03
Revestimento	CBUQ	CBUQ	CBUQ
Base	ARC	Natural	ARC
Sub-Base	ARC	Natural	ARM
Subleito	Solo Local	Solo Local	Solo Local

FONTE: O Autor (2017)

A construção do “Trecho 03” (Quadro 15) não pôde ser executada devido à indisponibilidade de materiais pelo fornecedor. Os outros dois trechos foram executados, cada um com 10 m de comprimento por 6,6 m de largura, totalizando aproximadamente 132 m². Foram utilizadas as equipes que prestam serviço ao Distrito de Manutenção Urbana do Bairro Novo. Estas equipes dispõem dos seguintes equipamentos: rolo compactador liso, motoniveladora, caminhão basculante, retroescavadeira e caminhão espargidor, cada um com função específica (Quadro 16).

QUADRO 16 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A CONSTRUÇÃO DO TRECHO

Equipamento	Função	Quantidade
Retroescavadeira	Fazer escavações e remover o material excedente	01
Motoniveladora	Utilizada para espalhar o material no trecho	01
Rolo Compactador liso	Compactação do material e pela compactação da camada de asfalto	01
Caminhão espargidor	Aplicação da emulsão, que liga a camada de base com a camada de revestimento asfáltico	01
Caminhão Basculante	Transporte de materiais	03

FONTE: O Autor (2017)

A NBR n° 15.115 (ABNT, 2004a) fixa os critérios para execução de camadas de pavimentos utilizando agregados reciclados e serviu como base para a execução deste trecho. A umidade em campo poderia variar $\pm 1,5\%$ em relação à umidade ótima (ABNT, 2004a) e foi medida pelo método expedito do álcool de acordo como a norma DNER-ME n° 088 (DNER, 1994a). O grau de compactação (GC), relação entre a densidade máxima encontrada em campo e a densidade máxima calculada em laboratório, deveria chegar a 100%. A compactação em campo foi medida de acordo com a norma DNER-ME n° 092 (DNER, 1994b).

A verificação das condições do pavimento foi realizada por inspeção visual antes e depois da execução do trecho, conforme norma DNIT n° 008 (DNIT, 2003a) e DNIT n° 009 (DNIT, 2003b). A avaliação estrutural do pavimento foi verificada de acordo com a norma DNER-PRO n° 011 (DNER, 1979) e para executá-la foram marcados 06 pontos em cada trecho construído (02 no bordo esquerdo, 02 no centro e 02 no bordo lateral) (Apêndice 05), nos quais posteriormente seriam feitas as leituras das deformações do pavimento (Quadro 17) com auxílio da viga *Benkelman* e de um caminhão basculante carregado com 8,2 tf em cada eixo (DNER, 1979). O carregamento ocorreu no Distrito de Manutenção Urbana do Pinheirinho (DMU-PN), onde se localiza uma balança para grandes cargas. Os pontos foram demarcados no pavimento conforme um mapa de amostragem.

A análise da deflexão depende do tráfego projetado para a via, que neste estudo é considerado médio ($N=5 \times 10^5$ repetições) (PMSP, 2004a). Os cálculos envolvidos neste processo servem para fornecer a espessura do reforço em CBUQ a ser utilizado no pavimento. Em determinadas ocasiões, a estrutura do pavimento pode estar tão comprometida que o resultado da análise fornece uma espessura de CBUQ inviável, exigindo neste caso a reconstrução total do pavimento. A análise de cada caso é realizada comparando a deflexão admissível (D_{adm}) com a deflexão de projeto (D_p) (Quadro 18).

QUADRO 17 – PERÍODOS DE VERIFICAÇÃO DA BACIA DE DEFORMAÇÃO DO PAVIMENTO

Medição	Época
M01	Antes da execução do trecho
M02	Logo após a execução do trecho
M03	Dois meses após a execução do trecho

FONTE: O Autor (2017)

QUADRO 18 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

Medidas Defletométricas	Medidas Corretivas Recomendadas
$D_P \leq D_{Adm}$	- Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente; - Reparos locais; - Tratamento de Rejuvenescimento, se necessário;
$3D_{Adm} \geq D_P > D_{Adm}$	- Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente; - Reparos locais - Reforço com base no critério de deformabilidade;
$D_P > 3D_{Adm}$	- Aproveitamento total ou parcial do valor residual do pavimento existente; - Reparos locais; - Reforço com base no critério de deformabilidade e resistência; - Reconstrução;

FONTE: DNER (1979)

3.5 ANÁLISE DE CUSTOS E GANHOS AMBIENTAIS

Para ilustrar os ganhos ou prejuízos econômicos da utilização dos agregados reciclados, foi executada uma análise dos custos comparando os custos de mão de obra, equipamentos e materiais com os que seriam utilizados caso a construção deste mesmo trecho fosse realizada com agregados naturais. O valor envolvido também foi avaliado, no caso de que este material não fosse destinado para aterro sanitário e quando coletado pelo município. Esta comparação de custos foi realizada com base nos valores utilizados nas obras da cidade de Curitiba disponíveis no portal de compras da cidade (<http://www.e-compras.curitiba.pr.gov.br/>) e com informações de custos obtidas por meio de contato com técnicos da Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA).

Para a análise de ganhos ambientais, foi levantada a capacidade de produção destes materiais na região de Curitiba, em termos médios, e em qual porcentagem eles poderiam suprir as necessidades do município na execução de serviços substituindo o uso de agregados naturais. O levantamento foi executado com base em um estudo realizado pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do Paraná (SENAI-PR) em parceria com o Sindicato da Indústria da Construção Civil do Paraná (SINDUSCON-PR) para o ano de 2014.

Além disso, a Secretaria Municipal de Meio Ambiente forneceu dados de quantidade de entulho coletada na cidade entre 2013 e julho de 2017 e estudos preliminares da coleta de entulhos na cidade, bem como a composição destes entulhos (cerâmica, concreto, argamassas, madeiras e outros). O objetivo foi de

correlacionar a quantidade total de entulho coletada diretamente pela prefeitura e a porcentagem deste entulho que poderia ser utilizada para obras de pavimentos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PRODUTORES DE AGREGADOS RECICLADOS NA REGIÃO DE CURITIBA

Foram identificadas três empresas, na região metropolitana de Curitiba, como potenciais fornecedoras de RCD para ser aplicado como material de pavimentação. No entanto, apenas duas mostraram interesse no desenvolvimento do estudo. A empresa A produz agregados reciclados de concreto (ARC) e a empresa B agregados reciclados mistos (ARM) (Figura 12).

FIGURA 12 –PRODUÇÃO DE ARM – EMPRESA B



FONTE: O Autor (2015)

Os produtos e os custos variam de acordo com as frações granulométricas que compõe os tipos de agregados (Tabela 3). Nota-se que a variação de preços é pequena entre os dois fornecedores, contudo, a empresa B apresenta custos em média 5,92% mais caros que a empresa A. Este custo mais elevado não se justifica, tendo em vista que os agregados mistos recebidos para ensaios apresentavam mais contaminantes (plásticos, madeiras, etc.) que os agregados da empresa A, que é mais criteriosa no recebimento dos resíduos na usina de produção (apenas cargas com resíduos classe A com origem cimentícia ou rochas).

As duas empresas trabalham com usinas fixas, ou seja, o material é recebido, processado e depois comercializado. A capacidade de produção varia de acordo com

o recebimento de material, podendo chegar a 5.600 m³/mês na empresa A e 3.200 m³/mês na empresa B. Segundo os proprietários das empresas, em virtude da crise econômica no Brasil, a produção e comercialização dos produtos está em um momento delicado, diferente do que era observado em anos anteriores.

TABELA 3 – CUSTOS DE AGREGADOS RECICLADOS POR M³ (POSTO OBRA)

Tipo de material	Empresa A (R\$)	Empresa B (R\$)
Brita Graduada	26,32	26,50
Brita 4A	21,50	21,50
Rachão / Marroada	35,00	39,00
Saibro	15,00	20,00
Areia Reciclada	38,00	41,00
Pedra Brita 01	35,00	35,00
Pó + Pedrisco	35,00	35,00

FONTE: O Autor (2017).

4.2 AVALIAÇÃO PRELIMINAR DOS AGREGADOS RECICLADOS EM MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

Algumas aplicações com agregados reciclados foram realizadas em pequenas obras do município de Curitiba, uma vez que a partir de 2015 passou-se a adquirir estes materiais. Elas serão descritas a seguir, contemplando também as experiências e impressões que os técnicos obtiveram. Todos os trechos foram construídos com agregados reciclados de concreto (ARC), visto que este é o tipo de agregado que vem sendo adquirido pela PMC. O agregado misto não foi estudado nesta etapa do trabalho, embora a destinação apropriada para este tipo de material seja, talvez, mais importante que o de concreto, dado que ele é encontrado em maior quantidade em canteiros de obras e descartes irregulares.

a) Utilização para base e sub-base de pavimento

Três trechos foram analisados para avaliar o comportamento dos agregados reciclados em bases de pavimentos (Tabela 4).

TABELA 4 – EMPREGO DE AGREGADOS RECICLADOS COMO BASE DE PAVIMENTOS EM TRECHOS DE AVALIAÇÃO PRELIMINAR

Dados	Trecho 01	Trecho 02	Trecho 03
Localização	Rua Vereador Angelo Burbello, Umbará	Rua Lira, Sitio Cercado	Rua Angelo Moro, Sitio Cercado
Período de execução	08 a 09/03/2016	11/08 a 15/08/2016	17 a 21/07/2017
Condições climáticas	Início de precipitação	Bom, com pequenas precipitações após a compactação	Bom, seco
Tráfego	Pesado	Médio	Leve
Dimensões do trecho	Largura: 3 m Comprimento: 10 m Espessura: 35 cm	Largura: 1 m Comprimento: 25 m Espessura: 25 cm	Largura: 7 m Comprimento: 20 m Espessura: 30 cm
Equipamentos	Retroescavadeira, Rolo Compactador, Caminhão espargidor, Caminhão basculante		
Materiais empregados ⁽¹⁾	Brita 4A ARC (e=20 cm); Graduada ARC (e=10 cm); CBUQ (e=5 cm)	Graduada ARC (e=20 cm); CBUQ (e=5 cm)	Brita 4A Natural (e=15 cm); Graduada natural (e=10 cm); Graduada ARC (e=10 cm); CBUQ (e=5 cm)
Vistorias	08 a 09/03/2016	16/08/2016 a 07/04/2017	22/07 a 04/09/2017

FONTE: O Autor (2017). (1) Espessuras das camadas após compactação

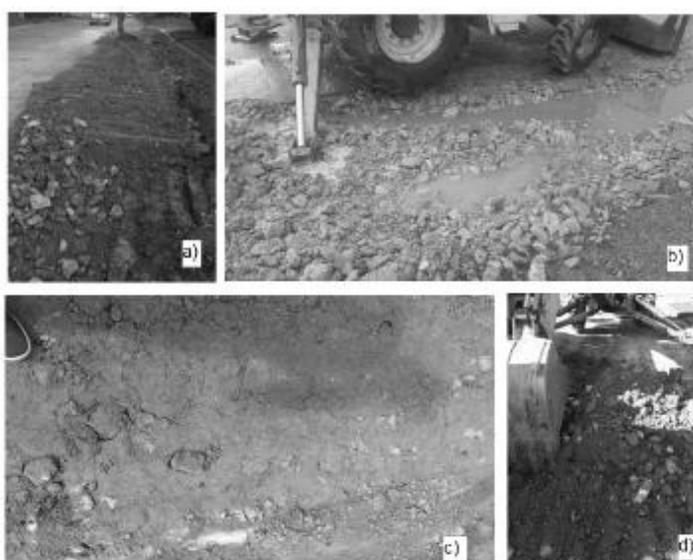
O primeiro trecho foi construído em março de 2016 na Rua Vereador Ângelo Burbello, no bairro Umbará, após obras de melhoria do sistema de drenagem que danificaram a borda direita do pavimento. Para realizar a recomposição, pretendia-se utilizar agregados reciclados de concreto em um trecho de 10 m de comprimento por 3 m de largura. Era a primeira vez que o material seria utilizado no Distrito de Manutenção Urbana do Bairro Novo.

A escavação foi realizada com aproximadamente 30 cm de profundidade e ao iniciar-se o preenchimento com o material, uma forte precipitação atingiu o local. Certa quantidade de terra escorreu para cima do agregado recém-aplicado e, no dia seguinte, não foi possível executar a compactação, pois o material perdeu sua estabilidade, provavelmente por causa da alta absorção de água. No final, optou-se pela remoção do agregado reciclado e a colocação de agregados naturais, que

“realmente são bons, ao contrário deste material”, segundo os funcionários que trabalharam no local (Figura 13).

Este comportamento físico inadequado pode ser atribuído à ocorrência de precipitação antes da compactação do material, o que pode ter afetado a sua estabilidade. Isto foi confirmado nos ensaios laboratoriais, que serão discutidos no item 4.3.1.2, pois o excesso de água dificulta a compactação e a estabilidade. Além disso, o material pode ter sido entremeado pela terra, a qual se difundiu por ele e o cobriu. Outro ponto de destaque é que o episódio fortaleceu a crença de que o material é inadequado para o uso em pavimentos, isto porque costuma-se tentar utilizá-lo da mesma forma que o agregado natural, que tende a ser menos sensível à umidade; quando na verdade, alguns cuidados adicionais devem ser considerados quando se utilizam os agregados reciclados.

FIGURA 13 – UTILIZAÇÃO DE ARC COMO REFORÇO DE BASE EM CURITIBA-PR



FONTE: O Autor (2016) - a) material sendo aplicado na pista; b) material encharcado e entremeado com terra; c) deformações e trincas após compactação e estabilidade comprometida; d) remoção do material.

Após esta experiência prévia, um segundo trecho foi construído na Rua Lira, no bairro Sitio Cercado. O motivo para construção deste trecho foi a implantação de uma tubulação sob a pista de rolamento, que acabou danificando o pavimento. O trecho foi construído com 25 m de comprimento por 1 m de largura. Após a conclusão da implantação da tubulação foi executada uma camada com cerca de 20 cm de

agregado reciclado de concreto. Foram utilizados ao todo 7,0 m³ de material classificado com “Brita Graduada Reciclada de Concreto”. Diferentemente da experiência da Rua Vereador Ângelo Burbello, não ocorreu precipitação durante a aplicação do material, que foi imediatamente compactado. Embora a camada asfáltica não tenha sido aplicada prontamente e o material tenha ficado exposto a pequenas precipitações durante 2 dias, a estabilidade da camada não foi comprometida e vistorias quinzenais ao local mostram que o pavimento continua em bom estado (Figura 14).

FIGURA 14 – UTILIZAÇÃO DE ARC COMO BASE DE COMPLEMENTO DE PAVIMENTO EM CURITIBA-PR



FONTE: O Autor (2017). a) Material compactado logo após aplicação; b) Material exposto à precipitação; c) Trecho executado vistoriado em abril/2017

Um terceiro trecho foi construído na Rua Ângelo Moro, no bairro Sitio Cercado, para avaliar o comportamento do agregado reciclado em comparação ao agregado natural. O motivo para construção deste trecho era o pavimento danificado em função de problemas estruturais da base (Figura 15a). Para o reforço da base no trecho de 20 m de comprimento por 7 m de largura, optou-se por utilizar materiais reciclados e naturais. A sub-base foi construída com brita 4A natural (Figura 15b) em uma espessura de 15 cm e a base foi dividida em brita graduada natural (3,5 x 20 m) e brita reciclada de concreto (3,5 x 20 m), ambas com espessura de 10 cm. O revestimento foi executado em CBUQ na espessura de 5 cm.

Neste trecho, o objetivo era observar o comportamento do material aplicado após compactação sem receber imediatamente a capa de asfalto. Isto porque desde o primeiro experimento criou-se uma hipótese de que este material não poderia ficar “descoberto”, sofrendo ação do tráfego/intempéries. O material foi aplicado e ficou exposto, após compactação (Figura 15c), por 3 dias consecutivos, nos quais não houve incidência de precipitação forte e apenas pequena ação de tráfego, uma vez que a via é considerada de tráfego leve. Antes de colocar a capa asfáltica, a via foi verificada e tanto a base de material reciclado quanto a de material natural não se apresentavam comprometidas. (Figura 15d). Em vistoria ao local, 40 dias após a conclusão dos serviços o trecho encontrava-se em bom estado, sem trincas ou deformações plásticas.

FIGURA 15 – RECUPERAÇÃO DO PAVIMENTO DA RUA ANGELO MORO



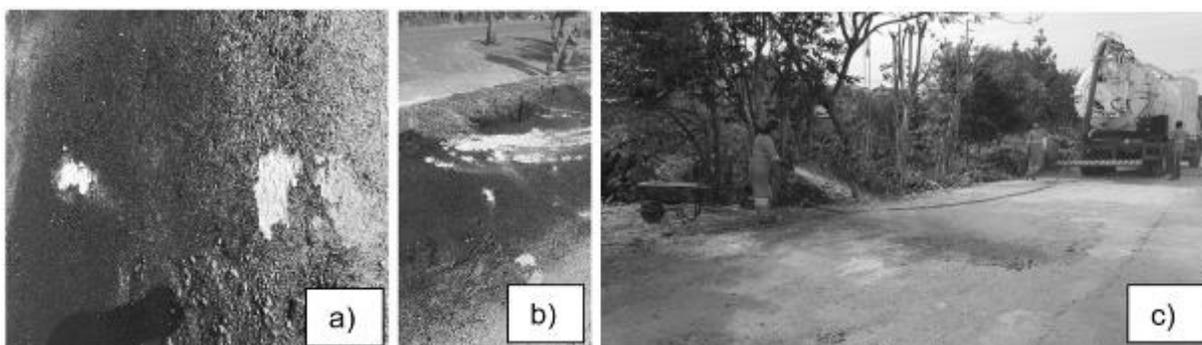
FONTE: O Autor (2017)

A partir dos três trechos analisados, pode-se concluir que precipitação inesperada, logo após o material ser descarregado no primeiro trecho, comprometeu a execução e análise do desempenho do material, mas serviu para constatar que em caso de chuvas durante a execução dos trechos não devem ser prosseguidos os trabalhos, recomendação presente na norma PMSP ETS nº 001/2003 (PMSP, 2003). Outra recomendação desta norma é que a camada de agregado reciclado deverá, quando necessário, ser drenada através de um lastro sob a sarjeta interligado a caixas

de captação de chuvas ou drenos, promovendo o escoamento de águas que eventualmente fiquem retidas nas camadas de base (PMSP, 2003). Os outros dois trechos mostraram que, desde que esteja compactada e com pouco tráfego, a base pode ficar exposta por um curto período de tempo sem sofrer grandes deformações que exijam que o trecho seja refeito. Esta observação é importante, porque muitas vezes a preparação da base ocorre separadamente da aplicação da massa, podendo demorar alguns dias entre um trabalho e outro. Caso o material não resistisse a algumas intempéries sua aplicação estaria seriamente comprometida para grandes obras, ficando limitada a pequenas intervenções em pavimentos que pudessem ser concluídas (escavação, aplicação do material e aplicação da capa asfáltica) no mesmo dia.

No caso da base ficar exposta sob ação de altas temperaturas recomenda-se que ela seja umedecida antes da aplicação da emulsão asfáltica, pois o agregado reciclado muito seco prejudica a aderência da emulsão na camada de base e, conseqüentemente, compromete a aderência do material asfáltico na estrutura do pavimento. Esta situação foi percebida em outras aplicações e relatada por técnicos da Prefeitura de Curitiba (Figura 16). Notou-se ainda uma evolução na aceitação do material por parte dos funcionários que trabalharam na execução dos trechos, que entenderam as particularidades do material, como sensibilidade à umidade e compactação adequada.

FIGURA 16 – ADERÊNCIA ENTRE A EMULSÃO E A BASE DE AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO DANIFICADA DEVIDO À BAIXA UMIDADE (a) (b) E UMEDECIMENTO DA BASE ANTES DA APLICAÇÃO DA EMULSÃO (c)



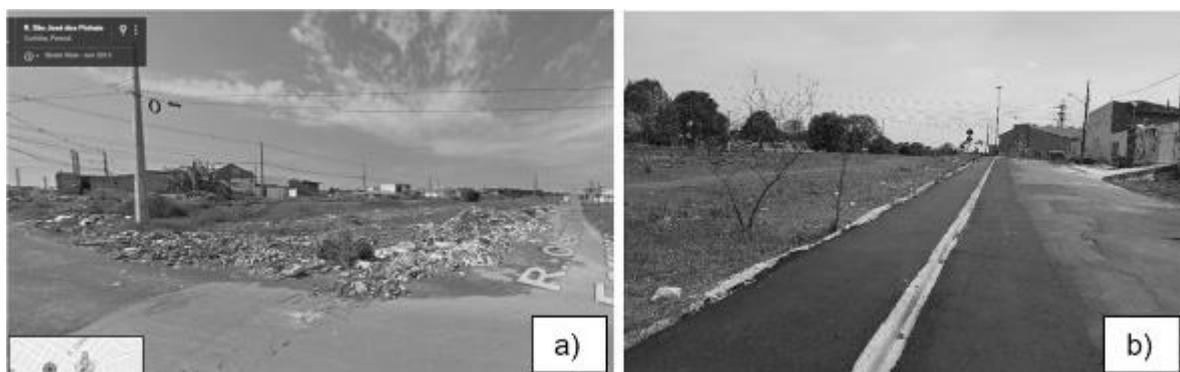
FONTE: O Autor (2017)

b) Utilização para base de calçada alternativa em CBUQ

Outra utilização para os agregados reciclados adquiridos foi a construção de trechos de ciclovia. Um desses locais era caracterizado historicamente pelo descarte irregular de resíduos da construção civil (Figura 17a), trata-se da Rua Clemente Mendes Ferreira, no bairro Sítio Cercado, que após essas melhorias, deixou de ser um ponto de descarte irregular de RCD da região. O trecho construído tem extensão de 300 m por 1,5 m de largura.

Devido ao tráfego mais baixo, a camada de base foi adotada como de 10 cm, com base em práticas executadas na Prefeitura de Curitiba, totalizando 63 m³ de material classificado como “Brita Graduada Reciclada de Concreto”. Visitas periódicas ao local ocorridas entre outubro de 2016 e setembro de 2017 demonstraram que o pavimento se encontra em boas condições de uso (Figura 17b). A recomendação apresentada acima sobre o umedecimento da base, caso fique exposta a ação do tempo seco, também é válida para a implantação de ciclovias.

FIGURA 17 – ANTES (a) E DEPOIS (b) DE CONSTRUÇÃO DE CICLOVIA COM BASE DE ARC



FONTE: Google Maps (Acesso em 10 de abril de 2017) e o Autor (2016)

c) Utilização como capa selante de Tratamento Superficial Betuminoso (TSB)

O estudo realizado para verificar a aplicação de brita graduada reciclada de concreto como material pertencente à capa selante de um tratamento superficial betuminoso duplo (Figura 18) mostrou que o material é inadequado para este uso. O alto teor de finos do material, geralmente cimento hidratado e cal, não permitiram a penetração da emulsão e o envolvimento dos grãos pela brita, o que ocasionou um desgaste da capa selante. Em menos de 2 meses, o trecho apresentou problemas

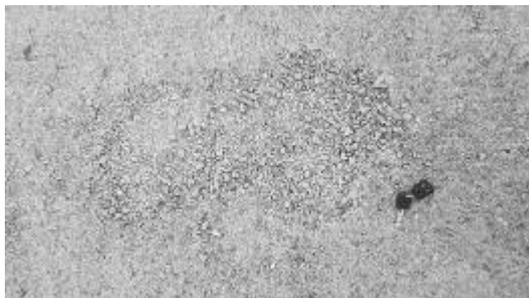
como buracos e desgaste da capa selante (Figura 19). A utilização de material reciclado para esta prática estaria sujeita à utilização de grãos com granulometria uniforme e limpos, (DNIT, 2012). Além disso, como os agregados reciclados são mais porosos que os naturais (MOTTA, 2005), a taxa de emulsão empregada deveria ser maior que a aplicada usualmente em tratamentos superficiais, para garantir o envolvimento dos grãos e aderência correta do ligante asfáltico.

FIGURA 18 – SEQUÊNCIA DA EXECUÇÃO DO TRECHO DE TSD COM BRITA GRADUADA RECICLADA DE CONCRETO



FONTE: O Autor (2017) (a) primeira pintura de ligação (b) aplicação de brita graduada reciclada de concreto (c) compactação da primeira camada (d) segunda pintura de ligação (e) compactação após aplicação de pó+pedrisco para capa selante (f) trecho concluído

FIGURA 19 – DESGASTE APRESENTADO NO TRECHO DE BRITA GRADUADA RECICLADA DE CONCRETO



FONTE: O Autor (2017)

d) Utilização em vias de revestimento primário

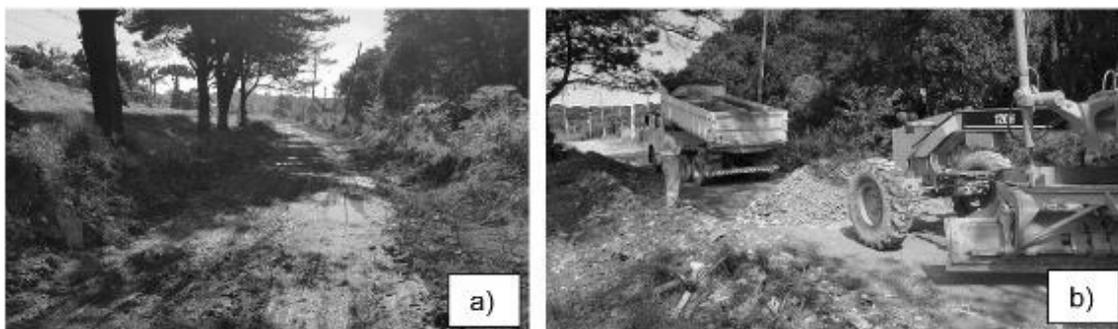
Outra utilização para agregados reciclados, prevista na NBR nº 15115/2004 (ABNT, 2004a), é a aplicação em vias de revestimento primário. Para esta utilização foi selecionada a Travessa Eli Volpato, no bairro Sitio Cercado. O trecho experimental foi executado com 20 m de comprimento por 5 m de largura, e a camada construída com “Saibro Reciclado de Concreto” tem 15 cm de espessura, totalizando a aplicação de 15 m³ de material. Neste local, havia a formação de poças de água que atrapalhavam o tráfego de veículos (Figura 20^a). A aplicação de saibro natural não estabilizava o local, onde a cada chuva era necessária a realização de manutenção.

A execução do trecho foi realizada no dia 16 de fevereiro de 2017 (Figura 20b) e em 03 vistorias realizadas até o dia 04 de setembro do mesmo ano o trecho apresentava boas condições de tráfego (Figura 21). O “Saibro Reciclado de concreto” diferencia-se da “Brita Graduada Reciclada de concreto” pela granulometria. A DMC do primeiro é de 10” enquanto a do segundo é de 1” (Figura 22), ou seja, por ser um material com agregados maiores, eles funcionaram como dreno para a água que ficava acumulada no local, ao mesmo tempo em que determinada quantidade de material fino ajudou no travamento.

Pode haver questionamento quanto ao encharcamento do material, que no caso da Rua Vereador Ângelo Burbello prejudicou a execução da camada, o que não ocorreu neste caso. Isto pode ser explicado pelo fato de que a água existente neste trecho era limitada, ao contrário do que ocorreu antes, onde houve umidade além dos limites ideais para compactação. Embora os agregados reciclados apresentem um teor ótimo de umidade superior ao dos agregados naturais (LEITE, 2007), a água em

excesso acaba prejudicando a resistência e estabilidade do material - conforme será demonstrado nos ensaios realizados laboratorialmente.

FIGURA 20 – VIA DE REVESTIMENTO PRIMÁRIO ANTES (a) E DURANTE A APLICAÇÃO DE SAIBRO RECICLADO DE CONCRETO (b)



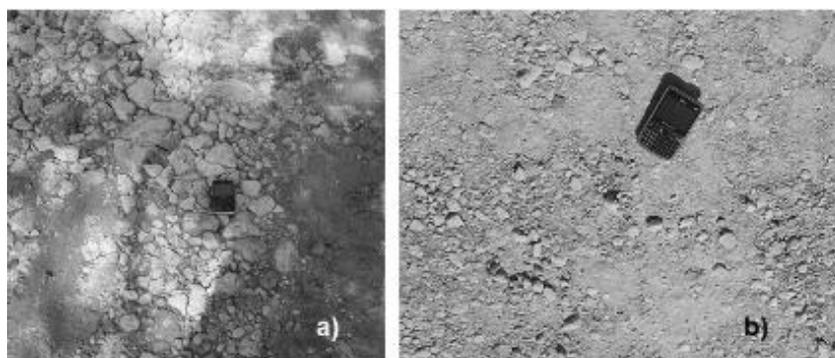
FONTE: O Autor (2017)

FIGURA 21 – TRECHO EXECUTADO COM AGREGADO RECICLADO APÓS 47 DIAS DA EXECUÇÃO



FONTE: O Autor (2017)

FIGURA 22 – DIFERENÇA GRANULOMÉTRICA ENTRE SAIBRO RECICLADO DE CONCRETO (a) E BRITA GRADUADA RECICLADA DE CONCRETO (b)



FONTE: O Autor (2017). Referência: retângulo de 10 por 6 cm.

Um aspecto muito positivo destes testes preliminares foi a familiarização dos profissionais que trabalham com a recuperação dos pavimentos. Notou-se evolução e maior aceitação deste tipo de material que antes era prontamente rejeitado, mesmo sem base técnica para tal. Além destes locais exemplificados, o agregado reciclado de concreto com suas diferentes variações (saibro, brita 4A e brita graduada) tem sido empregadas em diversas obras de pequeno porte para reparo de pavimentos ou ciclovias. Desde 2015 (quando ocorreram as primeiras compras de AR) até setembro de 2017, somente o DMU Bairro Novo utilizou aproximadamente 1.700 toneladas de material reciclado em suas intervenções, o que representa cerca de 17% dos agregados comprados pelo departamento no período.

Atualmente, é desejado que as obras de manutenção da cidade utilizem ao menos 25% de material reciclado em suas intervenções. No futuro, considerando a utilização deste tipo de material em grandes obras, a cidade poderia elevar estes índices, incluindo não só os agregados reciclados de concreto, mas também os agregados reciclados mistos que representam uma parcela significativa dos RCD gerados nos canteiros de obra.

4.3 AVALIAÇÃO LABORATORIAL DOS AGREGADOS RECICLADOS

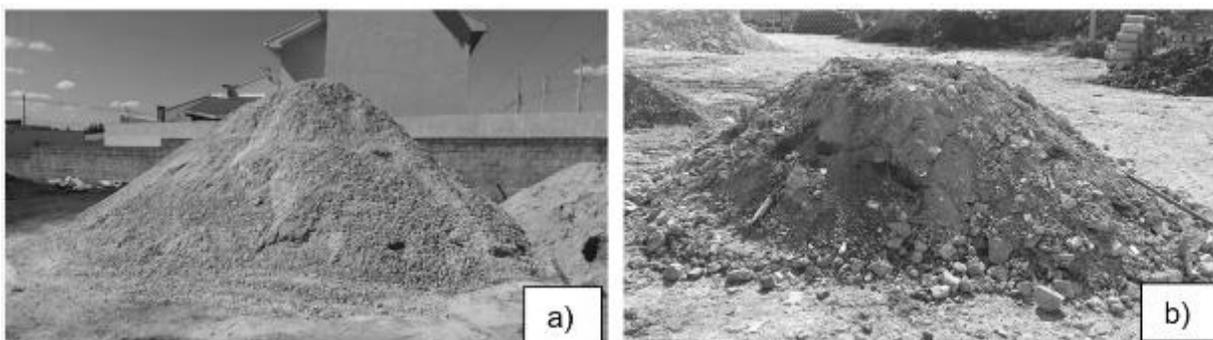
Além das avaliações preliminares de aplicação dos agregados reciclados em obras de pavimentação, eles também foram avaliados laboratorialmente. Nesta etapa, foram analisados tanto os agregados reciclados de concreto quanto os mistos, fornecidos pelas empresas A e B, respectivamente, citadas no item 4.1. Foram realizados ensaios de caracterização e resistência mecânica para ambos os tipos. No caso dos agregados reciclados de concreto, devido à maior disponibilidade, realizou-se um planejamento fatorial de experimento com composto central, a qual é uma alternativa de análise para determinação do ponto de compactação ideal do material.

4.3.1 Caracterização dos agregados reciclados

a) Composição

Os agregados reciclados analisados estavam depositados no pátio do Distrito de Manutenção Urbana do Bairro Novo (DMU-BN) (Figura 23). Inicialmente os agregados foram classificados quanto a sua composição e, conforme já preconizado, os agregados fornecidos pela empresa A foram classificados como “Agregado Reciclado de Concreto – ARC” e os fornecidos pela empresa B como “Agregado Reciclado Misto – ARM”.

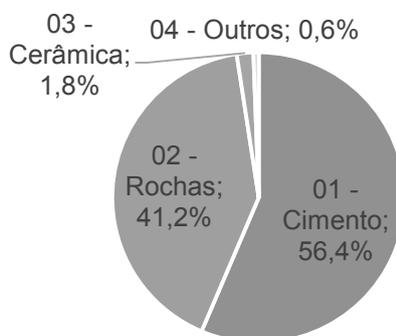
FIGURA 23 – MATERIAL PARA ENSAIO DE ARC (a) E ARM – 1º LOTE (b)



FONTE: O Autor (2016)

De acordo com a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b), a amostra fornecida pela empresa A pode ser considerada como agregado reciclado de concreto (ARC), pois contém mais de 90% da sua composição formada pela soma de produtos cimentícios e rochas (Figura 24). Além disso, os materiais não minerais de mesmas características não ultrapassaram os 2% e a porção de materiais minerais de características distintas não ultrapassou os 3% da massa em nenhuma das amostras ensaiadas (ABNT, 2004b).

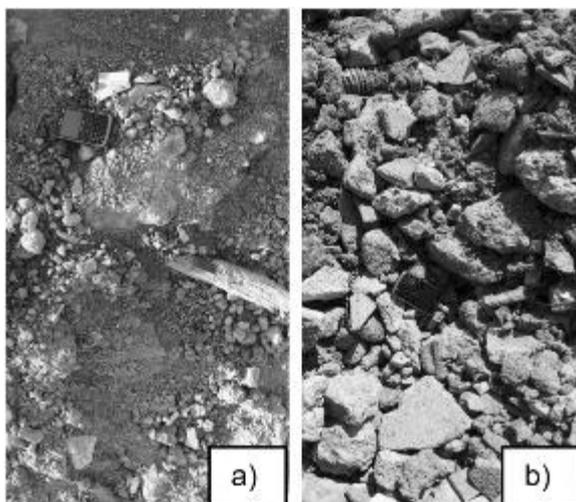
FIGURA 24 – COMPOSIÇÃO DE ARC (MÉDIA)



FONTE: O Autor (2016)

A amostra fornecida pela empresa B estava visivelmente contaminada com restos de madeira, terra e outros resíduos da construção civil (tubos de PVC e ferro) (Figura 25), o que demonstra que o material não passou por qualquer tratamento prévio eficaz de seleção. Este grau de contaminação refletiu nos ensaios de composição, nos quais em média 6,9% da massa de material grosso (maior que 4,8 mm) apresentavam materiais não minerais, como madeira, plástico e gesso (Figura 26). Logo, está reprovado com base na NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b), que limita a soma destas frações a 3% da massa total. Por fim, este material foi considerado ARM, pois as frações cimentícias e de rochas somaram 70,9% da massa, ou seja, menos de 90% (Figura 27).

FIGURA 25 – ASPECTO DO AGREGADO RECICLADO MISTO FORNECIDO PELA EMPRESA B



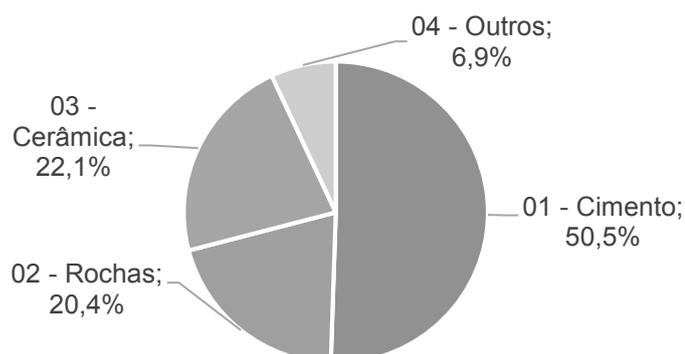
FONTE: O Autor (2016). Referência: retângulo de 10 por 6 cm.

FIGURA 26 – MATERIAIS NÃO MINERAIS E TORRÕES DE ARGILA



FONTE: O Autor (2016). Referência: caneta de 15 cm

FIGURA 27 – COMPOSIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO MISTO – ARM – LOTE 01 (MÉDIA)



FONTE: O Autor (2016)

Apesar de o material não passar na análise de composição, alguns outros ensaios como granulometria, equivalência de areia e abrasão Los Angeles, foram realizados com esta amostra. O material foi igualmente reprovado, pois não se enquadrava nos requisitos prévios: não foi encontrada nenhuma faixa granulométrica para enquadrar o material, a equivalência de areia foi inferior a 40% (valor mínimo para este requisito) e a abrasão Los Angeles foi superior a 60% (o limite é de 50%) (CURITIBA, 2015).

Embora requisitos como equivalência de areia e abrasão Los Angeles não constem na NBR nº 15.116 (ABNT, 2004b), eles são parâmetros exigidos na especificação de compra da Prefeitura de Curitiba (CURITIBA, 2015) e, por este motivo, foram verificados na pesquisa. Após a recusa do primeiro lote, foi solicitado que a empresa fornecesse um segundo lote de material para análise. (Figura 28). Desta vez, o segundo lote estava visivelmente menos contaminado por frações inadequadas a seu uso em pavimentação urbana.

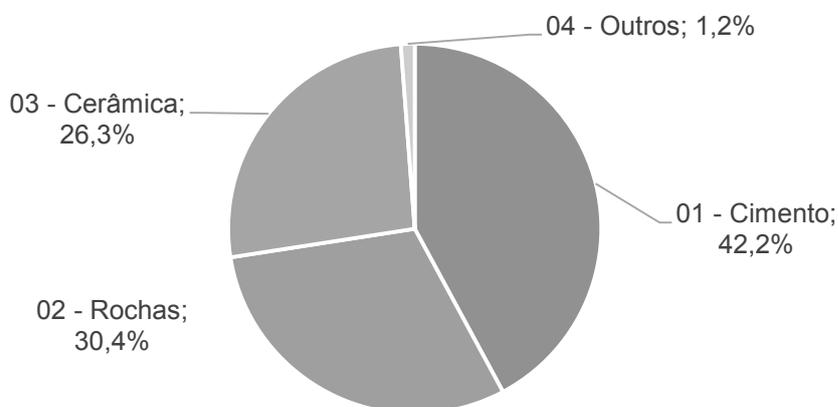
FIGURA 28 – SEGUNDO LOTE DE AGREGADO RECICLADO MISTO (ARM)



FONTE: O Autor (2017)

O novo lote fornecido pela empresa B também foi considerado agregado reciclado misto (ARM), pois apresentava menos de 90% da composição de materiais cimentícios e pétreos (72,5%), a quantidade de materiais cerâmicos totalizou 26,3% e outros resíduos somaram 1,2% (Figura 29), dentro dos limites da NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b). Assim, o primeiro lote de ARM foi descartado e os resultados apresentados são referentes ao segundo lote. Os valores apresentados, tanto para ARC quanto para ARM, são uma média de três amostras que apresentaram baixo desvio padrão entre os grupos (cimento, rochas, cerâmica e outros).

FIGURA 29 – COMPOSIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO MISTO – ARM – LOTE 02 (MÉDIA)



FONTE: O Autor (2017)

b) Análise Granulométrica

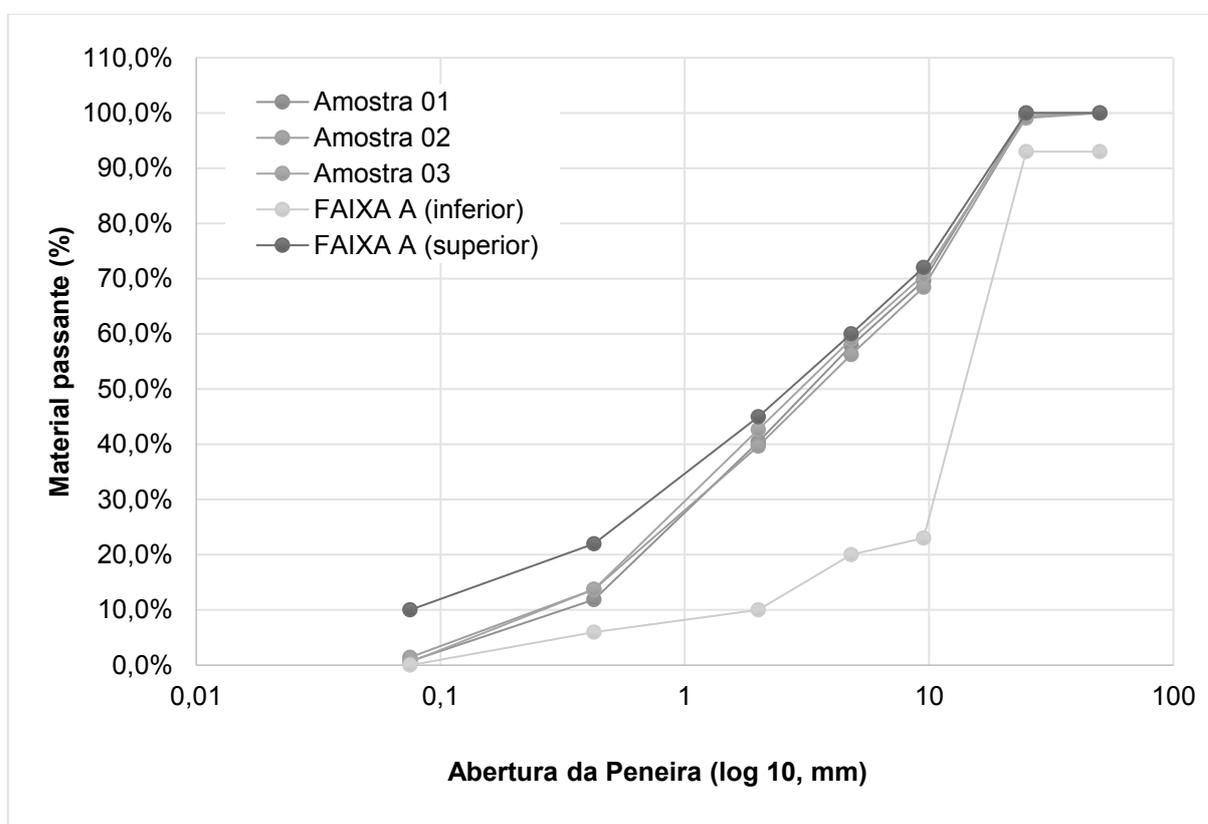
A granulometria (média de 03 amostras) do agregado reciclado de concreto (ARC) permitiu enquadrá-lo como faixa A (DNIT, 2010) (Tabela 5) (Figura 30). A DMC (Dimensão Máxima Característica) das amostras, medida pela curva granulométrica, resultou em 25 mm, ou seja, dentro do que estabelece a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b), que determina para este parâmetro a DMC de 63,5 mm. Com este valor, o material se enquadraria como “Brita Graduada Simples” pela norma PMC ES n° 021 (CURITIBA, 1999), e, por este motivo, o material será denominado “**Brita Graduada Reciclada de Concreto – BGRC**”.

TABELA 5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA – ARC

Resumo	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	FAIXA A (DNIT, 2010)		Média ⁽¹⁾	Desvio Padrão
2"	100,00%	100,00%	100,00%	93%	100%	100,000%	0,000%
1"	100,00%	99,43%	99,08%	93%	100%	99,502%	0,380%
3/8"	69,58%	68,46%	70,62%	23%	72%	69,553%	0,884%
N 4	57,88%	56,26%	59,02%	20%	60%	57,719%	1,132%
N 10	40,43%	39,66%	42,69%	10%	45%	40,927%	1,284%
N 40	11,84%	13,70%	13,72%	6%	22%	13,088%	0,883%
N 200	0,71%	1,42%	0,57%	0%	10%	0,901%	0,374%

FONTE: O Autor (2017). ⁽¹⁾ A média representa a % de material passante em cada peneira.

FIGURA 30 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS – ARC



FONTE: O Autor (2017)

Para os agregados reciclados mistos (ARM), os resultados do peneiramento não permitiram o encaixe das amostras em nenhuma das faixas granulométricas da norma DNIT nº 141 (DNIT, 2010), o que o desclassifica para uso em bases de pavimentos. No entanto, foi possível enquadrá-lo nas faixas de brita 4A pela norma interna PMC-ES nº 021 (CURITIBA, 1999) (Figura 31 e Tabela 6). As amostras 01 e

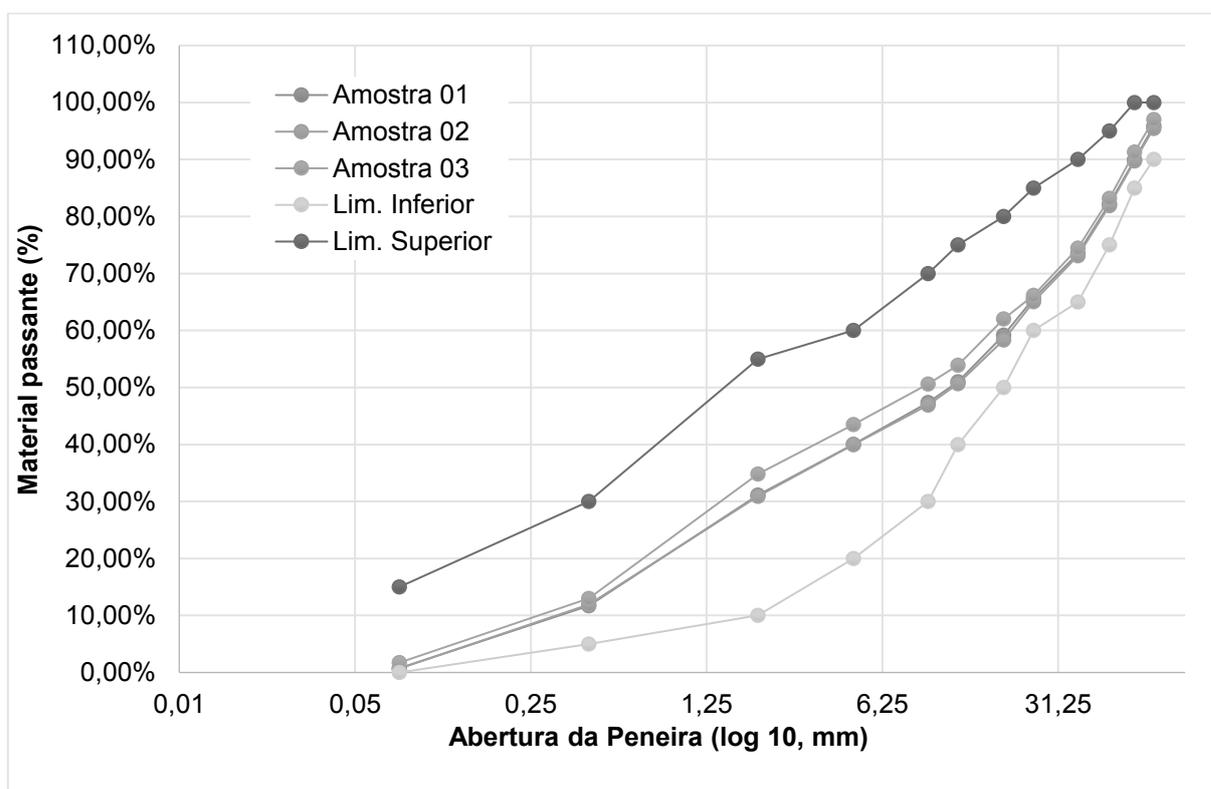
02 apresentaram granulometrias muito semelhantes e por este motivo suas curvas granulométricas aparecem praticamente sobrepostas (Figura 31). A brita 4A é um material utilizado como sub-base de pavimentos, e será denominada neste estudo, de **“Brita 4A Reciclada Mista – B4RM”**.

TABELA 6 – RESUMO DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA - ARM

Resumo	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Brita 4A - PMC		Média ⁽¹⁾	Desvio Padrão
3"	95,88%	95,46%	97,01%	90%	100%	96,12%	0,66%
2 1/2"	89,98%	89,72%	91,28%	85%	100%	90,33%	0,68%
2"	82,24%	81,93%	83,18%	75%	95%	82,45%	0,53%
1 1/2"	73,53%	73,10%	74,46%	65%	90%	73,70%	0,57%
1"	65,60%	65,05%	66,16%	60%	85%	65,60%	0,45%
3/4"	59,17%	58,34%	62,02%	50%	80%	59,84%	1,57%
1/2"	51,02%	50,68%	53,93%	40%	75%	51,88%	1,46%
3/8"	47,38%	46,89%	50,62%	30%	70%	48,30%	1,65%
N 4	40,05%	39,97%	43,50%	20%	60%	41,17%	1,64%
N 10	31,11%	30,88%	34,80%	10%	55%	32,26%	1,80%
N 40	11,73%	11,95%	12,99%	5%	30%	12,22%	0,55%
N 200	0,73%	0,69%	1,72%	0%	15%	1,05%	0,48%

FONTE: O Autor (2016). ⁽¹⁾ A média representa a % de material passante em cada peneira.

FIGURA 31 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS - ARM



FONTE: O Autor (2017)

A partir das curvas granulométricas é possível verificar a uniformidade da amostra, de acordo com os coeficientes de uniformidade (Cu) e Coeficiente de curvatura (Cc) (Tabela 7). Os valores para os diâmetros relativos ao percentual passante de material foram obtidos por leitura dos gráficos das Figura 30 e 31. Ambas as amostras se enquadraram no requisito da NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b), pois os coeficientes de uniformidade resultaram todos maiores que 10 (Tabela 7). De acordo com as recomendações de Leite (2007), o coeficiente de uniformidade deve ser maior que 15 e o coeficiente de curvatura contido entre 1 e 3, valores também respeitados por todas as amostras. A importância destes coeficientes está relacionada com o travamento do material e, conseqüentemente, um menor número de vazios entre as partículas, ou seja, o material pode ser considerado bem distribuído granulometricamente.

A curva granulométrica é capaz de fornecer ainda o teor de material passante na peneira n° 40 (0,42 mm). Segundo a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b), ele deve estar entre 10 e 40%, e pela especificação de compra de materiais da Prefeitura de Curitiba entre 5 e 30%, ambos os agregados atenderam a esse requisito (Tabela 7).

TABELA 7 – PARÂMETROS DE ANÁLISE DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS – ARC E ARM

Parâmetro	ARC - BGRC		ARM - B4RM		NBR 15116	LEITE (2007)	PMC
	Média	DP	Média	DP			
Cu	18,9	1,68	115,69	8,99	> 10	> 15	> 10
Cc	1,2	0,04	1,06	0,05	-	1 a 3	-
Passante #0,42	13,09 %	1,08 %	12,22 %	0,67%	10 a 40%	-	8 a 20% - BGRC 5 a 30% - B4RM

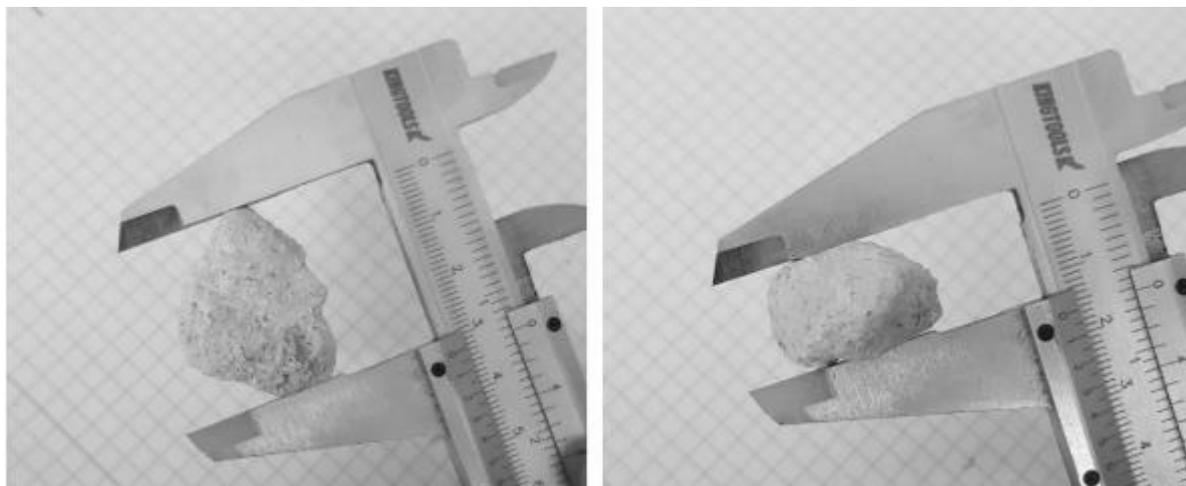
FONTE: O Autor (2017).

c) Índice de forma

É importante para verificar o travamento entre grãos, pois não devem ter formato lamelar, o qual dificultaria a compactação. O índice de forma foi obtido pela média da relação entre comprimento e largura (Figura 32) dos grãos com dimensão superior a 9,5 mm (ABNT, 2005). A média do índice de forma para o ARC foi 1,90 (desvio padrão de 0,49) e para o ARM de 1,53 (desvio padrão de 0,51), ou seja, ambos

os materiais respeitam os requisitos da norma, pois o índice de forma deve ser inferior a 3, segundo a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b).

FIGURA 32 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE ÍNDICE DE FORMA – ARC



FONTE: O Autor (2017)

d) Equivalente de Areia

Tanto as amostras de ARC quanto as de ARM apresentaram relação superior a 40% entre a leitura de areia e argila. A análise do coeficiente de variação mostra pequena variação entre as amostras (Tabela 8), valor este estabelecido pela especificação de compra de agregados reciclados da PMC (CURITIBA, 2015). A NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) não considera este parâmetro na caracterização dos agregados, mas ele é um indicador importante da quantidade de argila existente no material e está intimamente ligado à expansibilidade do mesmo. Um teor de areia superior a 40% significa um material com boas propriedades para utilização em camadas de pavimento (Bernucci et al., 2008).

TABELA 8 – EQUIVALENTE DE AREIA

Leituras	ARC – BGRC			ARM – B4RM			PMC
	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação	
Leitura Argila (cm)	24,7	1,3	5,3%	20,5	0,5	2,4%	-
Leitura Areia (cm)	11,0	0,0	0,0%	8,4	0,2	2,4%	-
Equivalência de areia	45%	-		41%	-		> 40%

FONTE: O Autor (2017)

e) Massa Unitária

A massa unitária média dos agregados reciclados em estado solto varia de acordo com o tipo de resíduo. A BGRC (ARC) teve uma massa unitária média de 1,49 ton/m³ enquanto a B4RM (ARM) 1,46 ton/m³. O valor do ARM, um pouco menor que o do concreto, pode estar relacionado à presença de cerâmicas na amostra e granulometria maior, o que dificulta o preenchimento de vazios. A Brita Graduada Natural apresenta uma massa unitária em torno de 1,65 ton/m³ (valores obtidos pelo Laboratório da SMOP). O conhecimento deste valor é importante para realizar cálculos de conversão e controle de recebimento de materiais na obra, onde geralmente não se dispõe de balança. Não foram encontrados valores em estudos realizados por outros autores. Tessarolo et al. (2012) apresentou uma densidade de 1,28 ton/m³ e Pinto (1999) 1,20 ton/m³ para RCD misturado. Este valor foi encontrado pois quando o RCD não está separado existem outras classes de materiais no meio, como plásticos e madeiras.

4.3.2 Ensaios mecânicos e de estabilidade

a) Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles, segundo a norma DNER-ME 035 (DNER, 1998a), avalia o índice de quebra dos materiais. Embora a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) não faça menção a este ensaio, ele é considerado requisito de aceitação dos materiais pela Prefeitura de Curitiba, onde este índice de quebras deve ser inferior a 50% para os agregados reciclados. As amostras apresentaram índice médio de abrasão Los Angeles de 47,3% para o ARC e de 62,3% para o ARM (Tabela 9), ou seja, somente o ARC estaria aprovado. O índice de abrasão do primeiro lote de ARM, 62,5% (desvio padrão = 0,6%), foi similar ao do segundo lote, o que pode ser atribuído à presença de materiais cerâmicos, menos resistentes à quebra.

TABELA 9 – RESULTADOS DO ÍNDICE DE ABRASÃO LOS ANGELES

	ARC - BGRC		ARM – B4RM		PMC
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
ALA (%)	47,3	0,6	62,3	1,5	50,00

FONTE: O Autor (2017)

Conforme citado, a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b) não faz referência a este tipo de análise, no entanto, a NBR n° 11.806 (ABNT, 1991) estabelece que o percentual seja de no máximo 40% para as bases com brita graduada. Os valores encontrados para ARC neste estudo são melhores que os obtidos por Fernandes (2004): 52% para ARC, e piores para o ARM quando comparados aos resultados de Motta (2005), que encontrou em seus estudos o valor de 50% para agregado misto. Os valores superiores ao limite estabelecido pela norma 11.806 (ABNT, 1991) podem significar que o ensaio de Abrasão Los Angeles é inadequado para a análise de agregados reciclados, o que, por sua vez, pode justificar a ausência deste parâmetro na NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b).

Segundo Bernucci et al. (2008), em algumas regiões do Brasil, como no município do Rio de Janeiro, não são encontrados agregados naturais que respeitem o limite de quebra (superando os 65% quando submetidos ao ensaio de abrasão Los Angeles). Nestes casos, devido à escassez e apesar dessa condição, eles foram utilizados em obras e seus desempenhos se mostraram satisfatórios. Com base nesta hipótese, recomenda-se que este tipo de ensaio para aceitação dos agregados reciclados na Prefeitura de Curitiba seja substituído por outros ensaios que também avaliam o índice de quebras dos grãos como, por exemplo, o índice de degradação após compactação: Proctor – IDP, determinado pela norma DNER-ME n° 398 (DNER, 1999). Neste ensaio o índice de quebras é obtido pela diferença de granulometria apresentada antes e depois da compactação e ele é similar ao de determinação da umidade ótima do material. A adoção deste tipo de ensaio é interessante pela facilidade de execução e equipamentos empregados (BERNUCCI et al., 2008).

b) Compactação

Este ensaio tenta reproduzir em laboratório o comportamento que o material terá durante a execução do trecho. São consideradas duas variáveis: o número de

golpes, que está correlacionado com a passagem do rolo de compactação, e a umidade, a qual está relacionada à lubrificação e facilidade de interação entre as partículas. A NBR n° 6.457 (ABNT, 2016) e a NBR n° 7.182 (ABNT, 1986) especificam os requisitos para realizar o ensaio.

A composição para moldar os corpos de prova dos agregados reciclados de concreto (Quadro 19) (Figura 33a) foi a mesma para todos os ensaios de compactação. Cada corpo de prova foi moldado sem reuso dos materiais. A energia de compactação utilizada foi a intermediária (atendendo aos requisitos da NBR n° 15.116/2004), com 26 golpes. Houve apenas a variação da umidade, iniciada em torno de 8%.

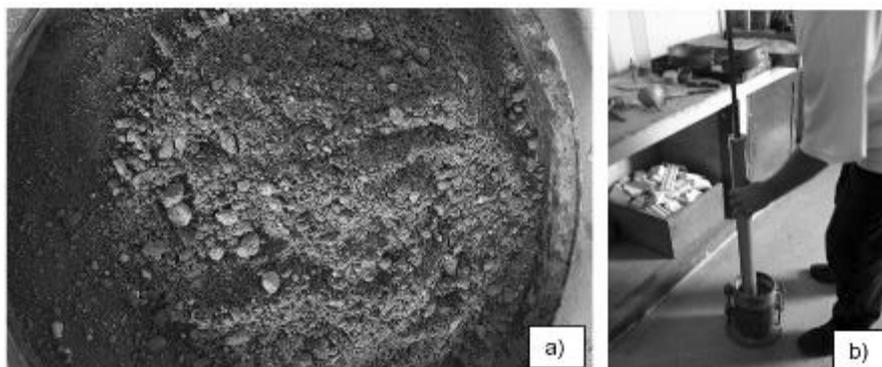
A Figura 33b mostra a moldagem de um corpo de prova para o ensaio. A Tabela completa com os dados obtidos se encontra no Apêndice 02. A equação de ajuste dos cinco pontos medidos de ARC foi obtida pelo Software Excel e resultou em uma equação de terceiro grau. A umidade ótima encontrada matematicamente foi de 13,7% para um peso específico seco máximo de $1,792 \text{ g/cm}^3$ (Figura 34).

QUADRO 19 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA - ARC

Peneira	Massa (g)	% Retido
4	3108	44,4%
Fundo	3892	55,6%
Total	7000	100%

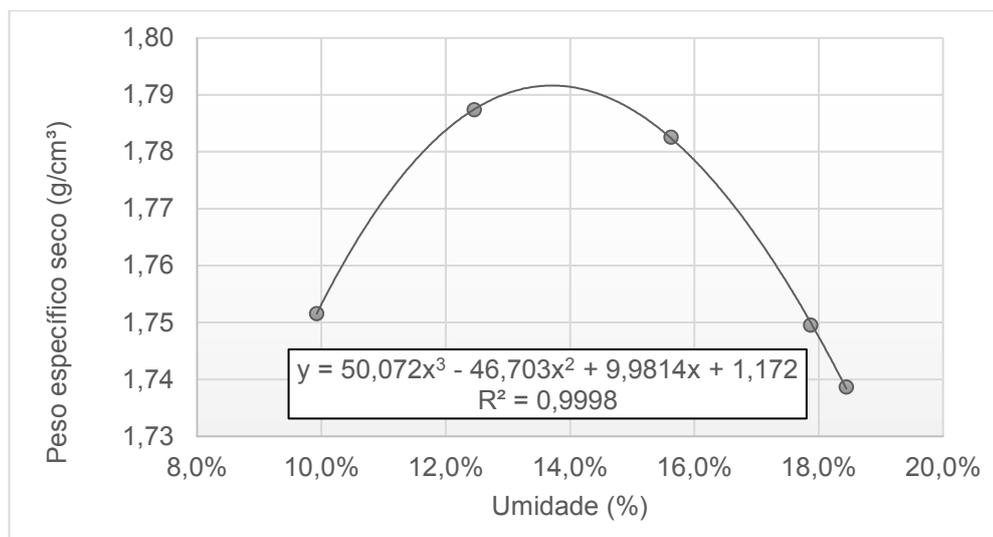
FONTE: O Autor (2016)

FIGURA 33 – COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA (a) e MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA (b) – ARC



FONTE: O Autor (2016)

FIGURA 34 – CURVA DE COMPACTAÇÃO – ARC



FONTE: O Autor (2017)

O mesmo procedimento foi realizado para os agregados reciclados mistos (ARM). No entanto, segundo a NBR n° 6.457 (ABNT, 2016), que determina o método de preparação de amostras de solos para ensaios de compactação e de caracterização, quando a fração de solo retido na peneira 19,1 mm (3/4") for maior que 30%, este material não deve ser ensaiado pelo método convencional do ensaio de compactação de solos. Esta situação foi verificada pelo ensaio de granulometria.

Contudo, como não foi encontrada nenhuma outra norma para realizar o ensaio de compactação, considerou-se a seguinte condição: quando a quantidade retida na peneira 19,1 mm (3/4") for maior que 10%, o material retido nesta peneira é passado na peneira 76,2 mm (3"), e o que for retido nesta última é desprezado. O material passante é então substituído por igual quantidade de material retido na peneira 4 (4,8 mm), o qual passa na peneira 19,1 mm (3/4"). A composição do corpo de prova com base em uma das amostras do ensaio de granulometria está apresentada no Quadro 20.

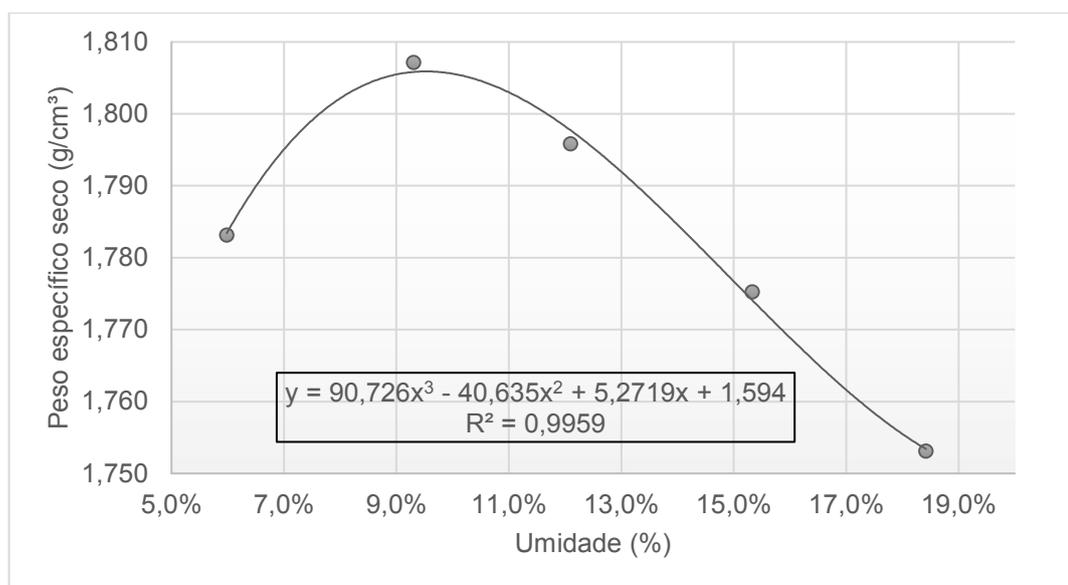
QUADRO 20 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA - ARM

Peneira	Massa (g)	% Retido
4	4076	58,2%
Fundo	2924	41,8%
Total	7000	100%

FONTE: O Autor (2017)

A equação de ajuste dos cinco pontos medidos de ARM foi obtida pelo Software Excel e resultou em uma equação de terceiro grau. A umidade ótima encontrada matematicamente foi de 9,5% para um peso específico seco máximo de 1,806 g/cm³ (Figura 35).

FIGURA 35 – CURVA DE COMPACTAÇÃO – ARM



FONTE: O Autor (2017)

Os valores de umidade ótima e densidade máxima foram encontrados por diversos autores (Quadro 21). Nota-se que existe diferença entre materiais com predominância de concreto e mista, no entanto, a diferença maior ocorre quando é feita a comparação com o agregado natural. Verifica-se, por exemplo, que no aspecto dos teores de umidade, uma compactação satisfatória dos agregados reciclados requer umidade muito superior para o material reciclado do que para o material natural, isto se deve em parte pela maior porosidade dos agregados reciclados – que não são rochas britadas extraídas diretamente de jazidas, mas sim resíduos de outras atividades. Além disso, nota-se que o peso específico seco máximo obtido pelo material natural é superior. Uma umidade superior requer maior controle em campo, enquanto uma umidade mais baixa (caso do material natural) pode ser conseguida muitas vezes pela umidade higroscópica do material.

QUADRO 21 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, CBR E EXPANSÃO

Material	Energia	Umidade Ótima (%)	Peso específico seco máximo (g/cm ³)	Autor
Concreto	Intermediária	13,7	1,792	Esta pesquisa
Misto	Intermediária	9,5	1,806	Esta pesquisa
Misto	Intermediária	14,6	1,760	Leite (2007)
Misto	Modificada	13,5	1,820	Leite (2007)
Misto	Intermediária	14,3	1,818	Nóbrega e Melo (2009)
Concreto	Intermediária	15,2	1,820	Fernandes (2004)
Misto	Intermediária	11,0	1,830	Motta (2005)
BGS	Intermediária	5,7	2,280	Leite (2007)
Concreto	Modificada	12,0	1,960	Arulrajah et al. (2014)
Concreto	Intermediária	11,0	1,870	Grubba (2009)

FONTE: O Autor (2017) com base em Leite (2007)

c) Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) e expansão

Para os resultados de CBR e expansão, além dos corpos de prova moldados nos ensaios de compactação, foram utilizados mais dois corpos de prova de cada material no ponto considerado de umidade ótima (com variação aceitável de $\pm 1,5\%$, conforme item 3.3.2.3) (Tabela 10). Do mesmo modo, todos os corpos de prova foram moldados com a energia intermediária (26 golpes). Estes dois parâmetros são requisitos da norma para utilização do material em camadas de pavimentos (ABNT, 2004b).

Analisando os resultados obtidos, pode-se concluir que para umidade ótima de $13,7\% \pm 1,5\%$, a BGRC apresentou índice de CBR médio de 78,04%, desvio padrão de 14,82% e expansão abaixo de 0,5%. Com estes requisitos, ela poderia ser utilizada como base de pavimentos para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 80 kN no período de projeto (ABNT, 2004b).

TABELA 10 – RESULTADOS DE CBR E EXPANSÃO – ARC E ARM

Material	Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)	
ARC - BGRC	9,9%	1,752	- (1)	0,01%	
ARC - BGRC	12,5%	1,787	67,93	0,04%	Faixa de Umidade Ótima ARC
ARC - BGRC	12,9%	1,799	71,15	0,04%	
ARC - BGRC	13,4%	1,771	95,05	0,04%	
ARC - BGRC	15,6%	1,783	54,21	0,00%	
ARC - BGRC	17,9%	1,750	34,71	0,03%	
ARC - BGRC	18,4%	1,739	11,54	0,00%	
ARM - B4RM	6,0%	1,783	30,63	0,13%	
ARM - B4RM	9,3%	1,807	87,31	0,18%	Faixa de Umidade Ótima ARM
ARM - B4RM	9,4%	1,805	56,67	0,15%	
ARM - B4RM	9,5%	1,807	48,50	0,17%	
ARM - B4RM	12,1%	1,796	53,61	0,09%	
ARM - B4RM	15,3%	1,775	19,91	0,03%	
ARM - B4RM	18,4%	1,753	6,13	0,02%	

FONTE: O Autor (2017). (1) Devido a um erro na prensa não foi possível realizar a leitura.

A B4RM apresentou para a umidade ótima em torno de 9,5% um CBR médio de 64,16%, com desvio padrão 20,46% e expansão inferior a 1,0%. Fatores que aprovam o seu uso como sub-base de pavimentos para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 80 kN no período de projeto (ABNT, 2004b). Apesar da média do CBR deste material ser superior a 60%, nota-se um desvio padrão elevado – os resultados variaram de 48,5 a 87,31% –, valor atribuído à difícil repetibilidade do ensaio de compactação para agregados (PINTO, 1999). Seu uso como sub-base foi determinado devido à composição granulométrica apresentada no item 4.2.

Resumindo, segundo os parâmetros de CBR e expansão, os materiais foram aprovados para a finalidade que se destinavam: base (ARC) e sub-base (ARM). Comparando os resultados encontrados, verificou-se que Leite (2007) apresentou um CBR médio de 73% para ARM e Grubba (2009) um CBR médio de 125% para ARC, Araújo et al. (2017) encontrou um valor de CBR para ARM igual a 72% na umidade ótima (10,98%). Nóbrega e Melo (2009), por sua vez, estudaram um ARM com CBR

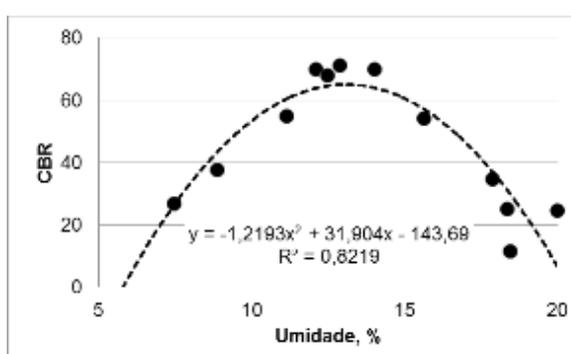
médio de 40,18%. Todos os dados citados são para energia intermediária (26 golpes). Verifica-se que os valores variam bastante entre os estudos, evidenciando a heterogeneidade dos agregados reciclados. Fatores como granulometria, tipo de agregado (ARM ou ARC) e execução do ensaio podem gerar resultados variados.

Neste estudo, os valores encontrados para expansão são muito baixos (o limite de expansão é 0,5% para materiais de base e 1,0% para sub-base). Leite (2007) e Araujo et al., ao estudarem ARM e Grubba (2009) investigando ARC, verificaram que a expansão foi nula. Nóbrega e Melo (2009) apresentaram uma expansão média de 0,23% para ARM. A expansão é uma característica de solos, ou seja, uma das hipóteses para o valor de expansão não ser nulo é a presença de uma parcela, ainda que pequena, de solo nas amostras ensaiadas.

4.3.3 Planejamento do composto central

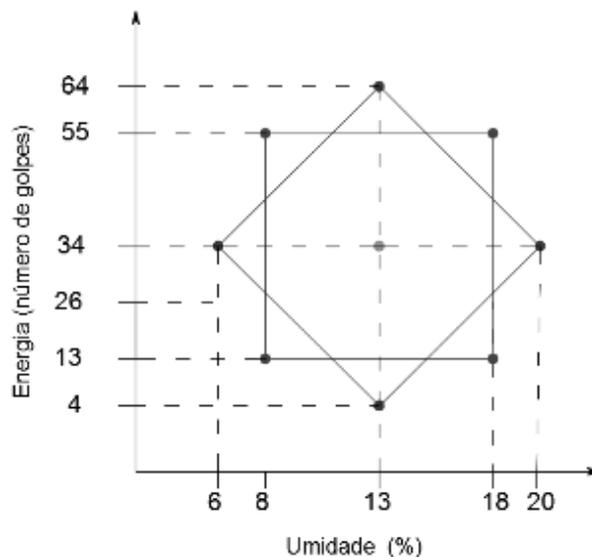
Além do ensaio univariado apresentado no item 4.3.2, o efeito da energia e da umidade foi estudado para o ARC (material disponível em maior quantidade para estudos) com o uso de um planejamento tipo estrela com triplicata no ponto central. Para este experimento, a umidade central de 13,0% foi fixada a partir da correlação entre umidade e CBR de vários experimentos realizados anteriormente com a energia intermediária (26 golpes) (Figura 36). A energia central de 34 golpes foi obtida pela média simples entre a energia baixa (13 golpes) e a modificada (55 golpes). Desta forma, ficou definido como ponto central do experimento a umidade (U) de $13,0 \pm 1,5\%$ e energia (E) de 34 golpes além de outros pontos axiais para descrever o planejamento estrela (Tabela 11 e Figura 37).

FIGURA 36 – EFEITO UNIVARIADO DA UMIDADE SOBRE A EXPANSÃO E O CBR - ARC



FONTE: O Autor (2017)

FIGURA 37 – PONTOS DO EXPERIMENTO TIPO ESTRELA – ARC



FONTE: O Autor (2017)

TABELA 11 – CONDIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA O PLANEJAMENTO EM ESTRELA COM PONTO CENTRAL

Parâmetro	$-\sqrt{2}$	-1	0	1	$\sqrt{2}$
Energia (Golpes)	4	13	34	55	64
Umidade (%)	6	8	13	18	20

FONTE: O Autor (2017)

A condição experimental correspondente ao ponto central ($13 \pm 1,5\%$, 34 golpes), realizada em triplicata (Tabela 12, exp. 5, 6 e 7), revelou pequena dispersão de valores. O valor médio foi de $100,58\%$ e o desvio-padrão de $5,05\%$, que podem ser considerados baixos quando comparados com estudos realizados por Leite (2007), o qual encontrou um desvio padrão de 14% para a energia intermediária (26 golpes) e 26% para a energia modificada (55 golpes), valores atribuídos à difícil repetibilidade do ensaio e heterogeneidade do material (PINTO, 1999).

TABELA 12 – EFEITO DA ENERGIA E UMIDADE SOBRE A EXPANSÃO E CBR

Experimento	Energia, codificado	Umidade codificada	Energia, Golpes	Umidade, %	Expansão, %	CBR, %
1	-1	-1	13	7,83	0,08	18,02
2	1	-1	55	8,03	0,07	110,09
3	-1	1	13	18,23	0,02	21,75
4	1	1	55	17,85	0,05	13,27
5	0	0	34	12,79	0,06	99,56
6	0	0	34	12,63	0,02	94,96
7	0	0	34	13,34	0,03	107,22
8	-1,41	0	4	13,51	0,10	7,01
9	1,41	0	64	11,50	0,04	89,56
10	0	-1,41	34	5,66	0,14	53,77
11	0	1,41	34	20,50	0,04	14,30

FONTE: O Autor (2017)

A ANOVA revelou que tanto a energia (E) e a umidade (U), na ordem linear e quadrática, bem como sua interação (1L by 2L), são estatisticamente significativas a 95% ($p < 0,05$) (Tabela 13) (Figura 38).

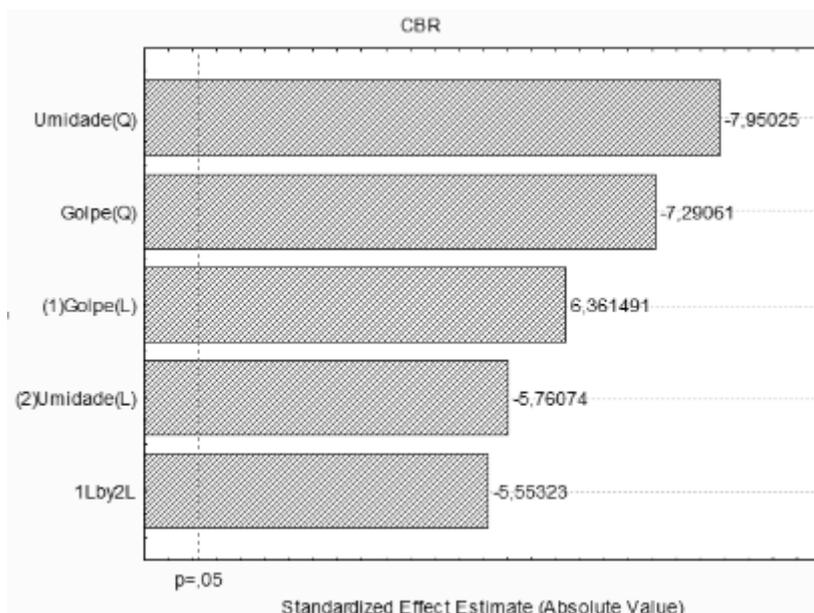
TABELA 13 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS EFEITOS INDIVIDUAIS E DA INTERAÇÃO LINEAR DA UMIDADE (U) E DA ENERGIA (E) NO CBR

Fator	SS	df	MS	F	P
(1) E (L)	3678,75	1	3678,749	40,46856	0,001419
E (Q)	4831,81	1	4831,808	53,15294	0,000760
(2) U (L)	3016,75	1	3016,746	33,18611	0,002213
U (Q)	5745,71	1	5745,714	63,20648	0,000508
1L by 2L	2803,32	1	2803,323	30,83832	0,002603
Erro	454,52	5	90,904		
Total SS	18622,03	10			

FONTE: O Autor (2017)

A superfície de resposta (Figura 39) revelou que o ponto ótimo de CBR demanda uma energia de compactação de 47 golpes e umidade de 10,1%, obtidos pela equação que a define.

FIGURA 38 – GRÁFICO DE PARETO DA INFLUÊNCIA DA ENERGIA (E) E UMIDADE SOBRE O CBR



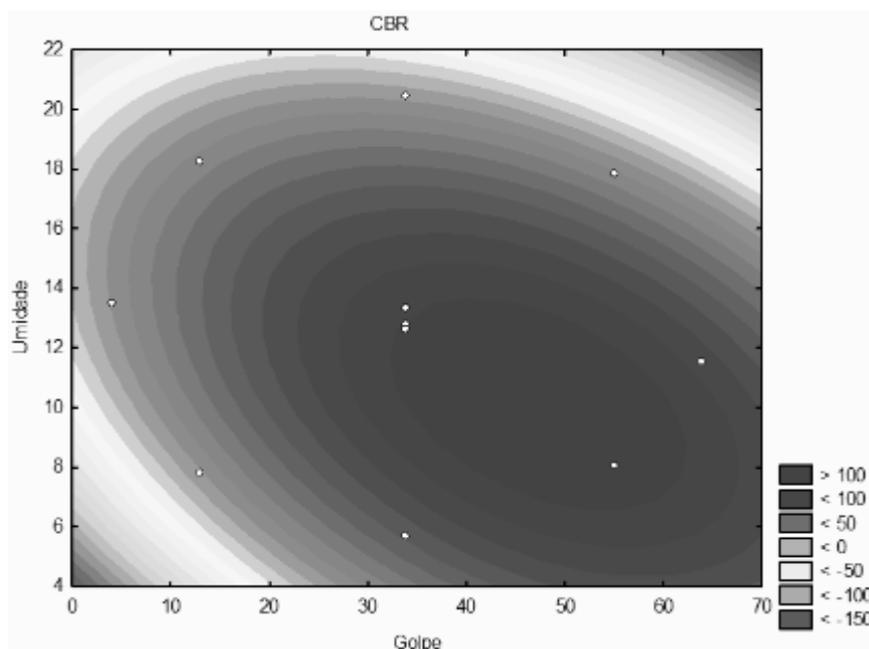
FONTE: O Autor (2017)

Caso se deseje utilizar menor energia, o que se traduz para campo como um menor número de passadas do rolo compactador, é necessário um teor de umidade maior. Ainda, pontua-se que com um CBR acima de 60%, o agregado pode ser usado para base de pavimento de tráfego leve e acima de 20% para sub-base, segundo a NBR n° 15.116 (ABNT, 2004b). Valores acima de 80% podem ser usados em tráfego pesado, mas esta norma não permite seu uso, o que sugere a relevância de testes de campo para alterar esse paradigma.

O modelo consegue prever muito bem a grande maioria dos valores observados (Figura 40). Isto também pode ser observado pelo gráfico de resíduos (Figura 41), o qual demonstra que há comportamento aleatório e, portanto, que o modelo é confiável (BARROS NETO et al., 2001). O valor predito de CBR em relação ao observado pode ser descrito pela equação (05), com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9752: valor elevado e sugestivo de bom modelo.

$$PREDITO = 0,9917 * OBSERVADO \quad (05)$$

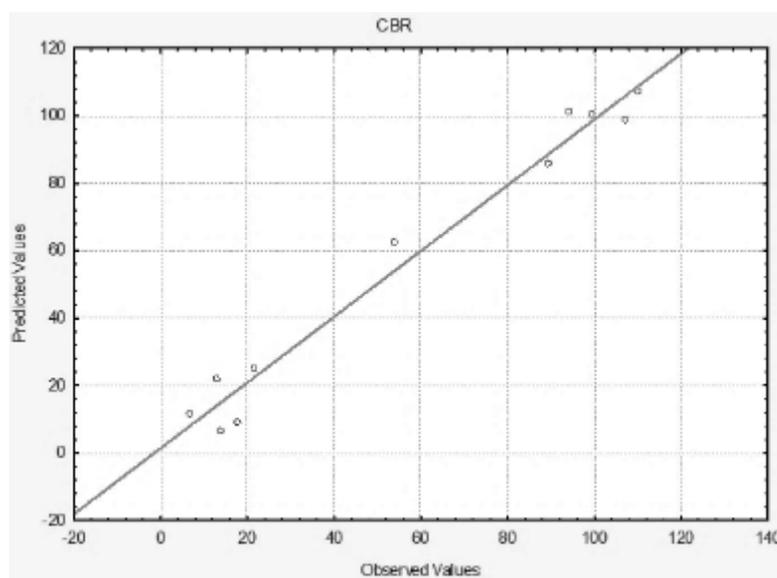
FIGURA 39 - EFEITO DA ENERGIA (E) E DA UMIDADE (U) SOBRE O CBR - ARC



FONTE: O Autor (2017)

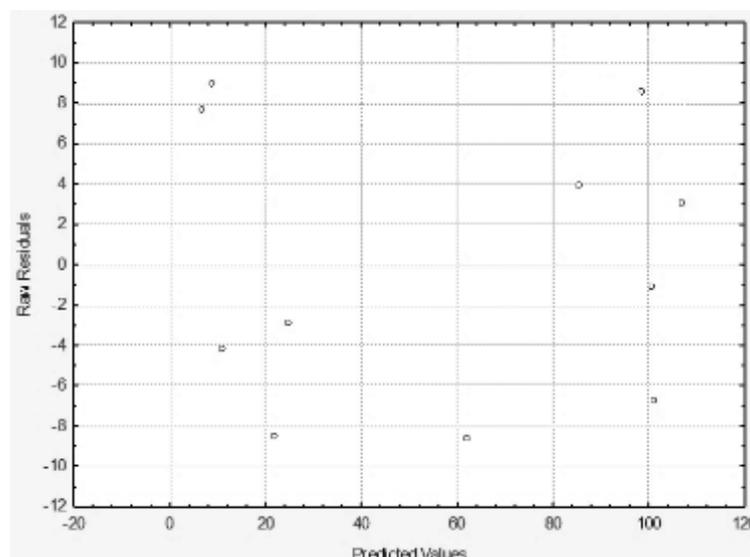
A análise da figura 39 revela que para uma umidade entre 6,5% e 13,0% e uma energia entre 35 e 60 golpes o valor de CBR encontrado é superior a 100% (valor comparável com o material padrão de ensaio). Esta faixa de umidade é maior que a estipulada pelo ensaio univariado ($\pm 1,5\%$) e pode refletir uma simplificação dos trabalhos em campo.

FIGURA 40 – PREVISÃO DO CBR EM RELAÇÃO AOS DADOS LABORATORIAIS - ARC



FONTE: O Autor (2017)

FIGURA 41 – RESÍDUOS – CBR – ARC



FONTE: O Autor (2017)

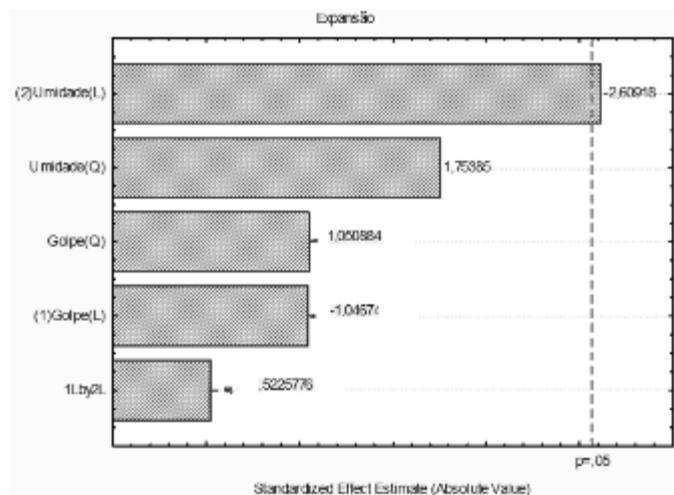
Houve efeito significativo a 95% para umidade (U) na ordem quadrática na propriedade de expansão (Tabela 14) (Figura 42). Esse efeito é observado na prática, uma vez que corpos de prova com menos umidade e/ou menos compactados tendem a apresentar uma expansão maior devido à capacidade de absorção da água, enquanto corpos de prova saturados ou bem compactados não conseguem ter essa propriedade (LEITE, 2007). Erros de leitura das expansões de alguns corpos de prova podem ter colaborado para que o efeito destas variáveis (energia de compactação e umidade) fosse observado estatisticamente.

TABELA 14 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS EFEITOS INDIVIDUAIS E DA INTERAÇÃO LINEAR DA UMIDADE (U) E DA ENERGIA (E) NA EXPANSÃO

Fator	SS	df	MS	F	P
(1) E (L)	0,000890	1	0,000890	1,095657	0,343161
E (Q)	0,000897	1	0,000897	1,104357	0,341426
(1) U (L)	0,005531	1	0,005531	6,807809	0,047717
U (Q)	0,002499	1	0,002499	3,075991	0,139827
1L by 2L	0,000222	1	0,000222	0,273087	0,623588
Erro	0,004063	5	0,000813		
Total SS	0,013400	10			

FONTE: O Autor (2017)

FIGURA 42 – GRÁFICO DE PARETO DA INFLUÊNCIA DA ENERGIA (E) E UMIDADE (U) SOBRE A EXPANSÃO

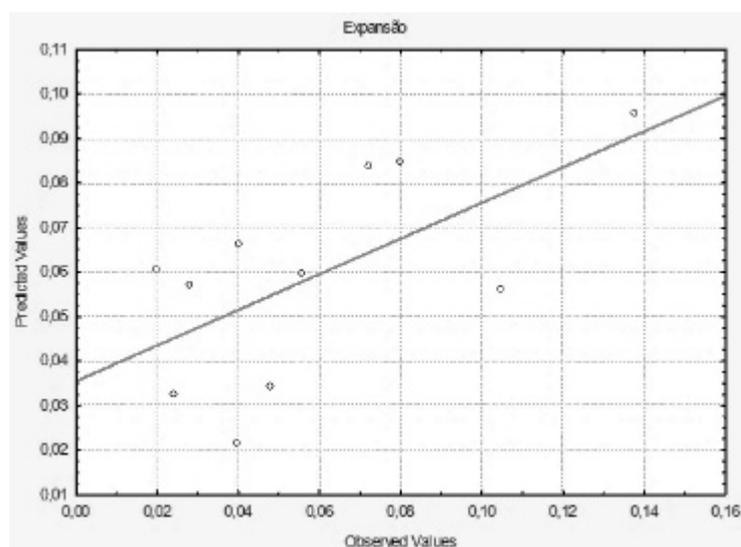


FONTE: O Autor (2017)

A previsão da expansão pela umidade não é boa (Figura 43). O valor predito de expansão em relação ao observado fornece uma equação (06) com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,265: o que confirma que a expansão não pode ser descrita por um modelo simplificado (Figura 44).

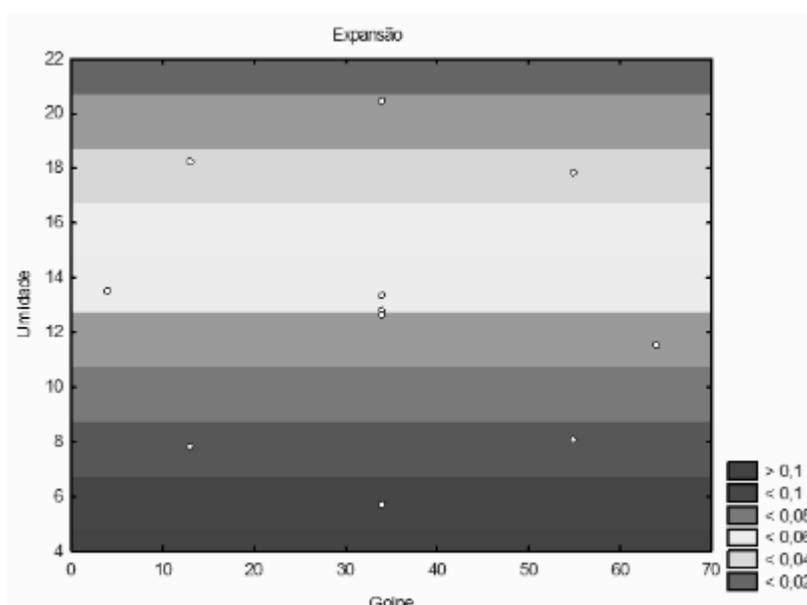
$$PREDITO = 0,8454 * OBSERVADO \quad (06)$$

FIGURA 43 – PREVISÃO DA EXPANSÃO EM RELAÇÃO AOS DADOS LABORATORIAIS - ARC



FONTE: O Autor (2017)

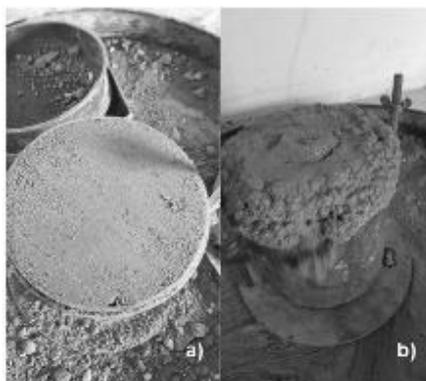
FIGURA 44 – EFEITO DA ENERGIA (E) E DA UMIDADE SOBRE O CBR - ARC



FONTE: O Autor (2017)

É importante mencionar algumas observações analisadas durante a moldagem dos corpos de prova. O uso da umidade correta ($\approx 13\%$) produz amostra coesa (Figura 45a), já seu excesso ($\approx 18\%$) torna inadequada a manipulação (Figura 45b). O giro do corpo de prova para leitura da expansão é praticamente inviável, pois o material com umidade excessiva escorre do interior da forma. No caso da compactação, independentemente do número de golpes, não se provocou a agregação do material. Isto confirma o estudo preliminar de campo, o qual revelou uma resiliência que inviabiliza sua estabilidade após a passagem do rolo compactador.

FIGURA 45 – ESTABILIDADE DO CORPO DE PROVA COM UMIDADE PRÓXIMA DA ÓTIMA (a) E COM UMIDADE ELEVADA (b) - ARC



FONTE: O Autor (2017)

A variação de CBR se deve a diversos fatores inerentes ao próprio ensaio, como os passantes e a variação do tamanho das partículas em função da grande heterogeneidade entre a fração de pedregulho ($> 3/4''$ ou 19,0 mm) e o material mais fino retido em peneira nº 4 ($> 4,8$ mm). Embora a distribuição granulométrica inicial seja a mesma, como nem toda amostra é colocada dentro do cilindro que molda o corpo de prova, podem existir corpos de prova com mais ou menos pedregulhos. Além disso, o pistão de rompimento de prensagem fica localizado na parte central do cilindro (observar Figura 46a), o que pode coincidir com a presença exata de uma pedra (Figura 46b).

FIGURA 46 – ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA PARA MEDIÇÃO DO CBR – ARC (a) E EXEMPLO DE PEDREGULHO LOCALIZADO SOB A ÁREA DE INFLUÊNCIA DO PISTÃO DE ROMPIMENTO DO CBR – ARC (b)



FONTE: O Autor (2017)

4.4 AVALIAÇÃO EM CAMPO DOS AGREGADOS RECICLADOS

4.4.1 Características da via

A Rua Cidade de Ouro, no bairro Sitio Cercado, foi a via escolhida para a construção dos trechos experimentais. O CBR do subleito da via foi calculado durante um estudo da Prefeitura em parceria com a Universidade Federal do Paraná pelo método DCP, que utiliza o penetrômetro Sul Africano (Figura 47a). O valor calculado para o CBR_{SL} foi 10,17% e o tráfego da via foi considerado médio para o período do

projeto ($N = 5 \times 10^5$) (PMSP, 2004a). O pavimento atual era do tipo antipó, ou seja, um tratamento superficial realizado no passado e que já estava com a vida útil vencida (Figura 47b).

FIGURA 47 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE CBR COM PENETRÔMETRO SUL AFRICANO (a) NA RUA CIDADE DE OURO – CURITIBA (PR) (b)



FONTE: O Autor (2015)

4.4.2 Dimensionamento do pavimento

Inicialmente, pretendia-se construir três trechos com variação dos materiais (ARC, ARM e agregado natural), no entanto, apenas dois foram concretizados. O terceiro trecho envolvia ARM, porém a quantidade necessária para execução não foi entregue pelo fornecedor (que alegou dificuldades na produção). Isto sugere que pode não haver disponibilização adequada de material para a demanda de uso em pavimentação urbana, o que contradiz o volume de RCD gerado para produção de agregados reciclados.

Os dois primeiros trechos foram construídos inteiramente com ARC (Trecho 01) e inteiramente com agregados naturais (Trecho 02), este último para controle. As espessuras das camadas (Quadro 22), bem como as especificações do projeto de pavimentação (Figura 48), obedeceram às demandas mínimas para o CBR. As espessuras foram definidas a partir do dimensionamento pelo método do DNER, apresentado nas seções 2.7.2.1 e 3.4.

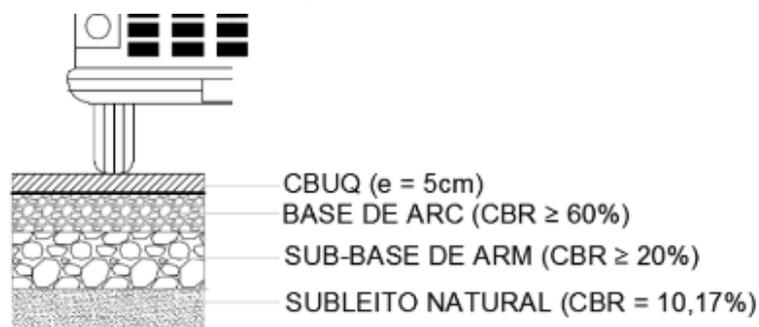
QUADRO 22 – DADOS DOS TRECHOS 01 E 02

Dados para execução em campo – Trecho 01 - ARC				
Camada	Material	Espessura (cm)	Umidade ótima (%)	Dens. seca máxima (g/cm³)
Revestimento	CBUQ	6,0	-	2,470
Bas	Brita Graduada - ARC	15,0	13,7± 1,5	1,792 - GC = 100%
Sub-Base	Brita Graduada - ARC	15,0	13,7± 1,5	1,792 - GC = 100%
Subleito	Argila Cinza c/ pedregulho	-	9,9	

Dados para execução em campo – Trecho 02 – Agregados Naturais				
Camada	Material	Espessura H (cm)	Umidade ótima (%)	Dens. seca máxima (g/cm³)
Revestimento	CBUQ	6,0	-	2,470
Base	Brita Graduada Natural	15,0	5,8 ± 1,0	2,280 - GC = 100%
Sub-Base	Brita 4A - Natural	15,0	5,8 ± 1,0	2,280 - GC = 100%
Subleito	Argila Cinza c/ pedregulho	-	9,9	

FONTE: O Autor (2017)

FIGURA 48 – CONFIGURAÇÃO DE UM TRECHO EXPERIMENTAL.



FONTE: O Autor (2017)

4.4.3 Execução dos trechos

O primeiro trecho executado foi composto inteiramente por agregados reciclados de concreto (ARC) e os parâmetros para controle (umidade e densidade) foram obtidos em laboratório e já apresentados no item 4.3.2. A dimensão do trecho construído foi de 10 m de comprimento por 6,6 m de largura. Inicialmente, foram

executados os serviços de escavação do pavimento antigo e compactação do subleito (Figura 49).

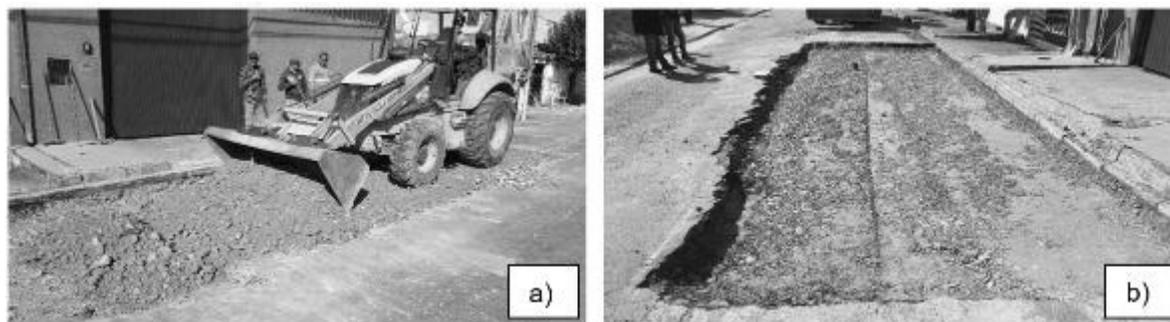
FIGURA 49 – ESCAVAÇÃO (a) E COMPACTAÇÃO DO SUBLEITO (b) – TRECHO 01



FONTE: O Autor (2017)

A sub-base (Figura 50) foi executada em uma camada de 15 cm, por se tratar de um pequeno trecho construído em duas partes (primeiro uma metade da rua e depois a outra), com uso de uma retroescavadeira para espalhamento do material e, posteriormente, um rolo compactador liso (Marca Caterpillar, Modelo CS423 E, Peso de operação 6.745 kg) foi utilizado para compactar a sub-base (Figura 50b). Para trechos maiores, utiliza-se uma motoniveladora para o espalhamento dos agregados. Ao longo da execução das camadas foram executados furos de sondagem para avaliar o grau de compactação (GC) – relação entre a densidade máxima encontrada em campo e a densidade máxima calculada em laboratório –, que deveria chegar a 100%.

FIGURA 50 – SUB-BASE DE ARC: ESPALHAMENTO (a) E TRECHO COMPACTADO (b)



FONTE: O Autor (2017)

Com a sub-base concluída, iniciaram-se os serviços de preparação da base do pavimento, também construído com BGRC (item 4.3.1-b). Os procedimentos foram os mesmos: espalhamento do material e compactação até obter o GC medido em laboratório (Figuras 51).

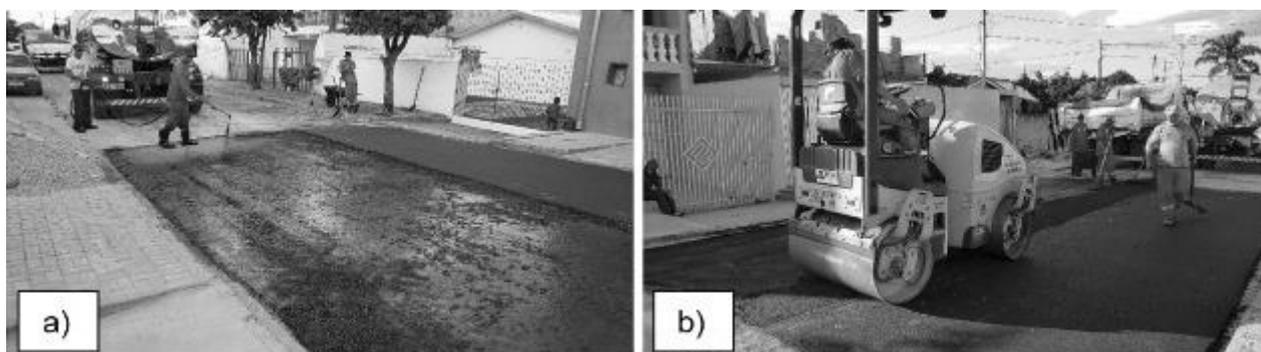
FIGURA 51 – BASE DE ARC COMPACTADA



FONTE: O Autor (2017). Referência: Caneta 15 cm

Após a compactação e liberação da base, foi realizada a imprimação com emulsão RM-1C e a aplicação de CBUQ faixa especial (Figura 52).

FIGURA 52 – IMPRIMAÇÃO (a) E APLICAÇÃO DO CBUQ (b) – TRECHO 01



FONTE: O Autor (2017)

A execução do Trecho 01 foi realizada no dia 30 de junho de 2017, com boas condições climáticas (tempo seco) e 08 horas de trabalho contínuo, desde a escavação até a finalização com a massa asfáltica. A umidade da BGRC (agregado reciclado) medida em campo foi de 12,7% e não necessitou correção pois estava dentro dos limites de projeto ($13,7 \pm 1,5\%$). Para atingir o GC de 100% foram

necessárias nove passadas de rolo compactador (cada passada corresponde a uma ida e uma volta de rolo).

Durante a execução, muitos moradores perguntaram sobre o serviço que estava sendo realizado e se mostraram adeptos ao uso de agregados oriundos de RCD para pavimentos. As equipes que participaram da execução do trecho não fizeram comentários negativos em relação ao material reciclado, mas apontaram questionamentos quanto a maior sensibilidade deste tipo de agregado à umidade e ao fato do material apresentar uma parcela considerável de pó, o que o deixa semelhante a uma “areia”.

Não ocorreram incidentes durante os serviços, como necessidade de correção da umidade, rompimento de tubulações de outras Concessionárias (esgoto e água) e/ou equipamentos quebrados, de modo que o tempo para execução do trecho foi suficiente para concluí-lo em um dia de trabalho. A preocupação em finalizar o trecho no mesmo dia (desde a escavação até a aplicação da massa asfáltica) poderia ser um fator limitante do uso de agregados reciclados na pavimentação de vias, no entanto, os estudos preliminares mostraram que é possível que o material fique exposto à pequena ação do tráfego ou intempéries, desde que sua superfície seja corrigida antes da aplicação do revestimento asfáltico.

O segundo trecho, denominado “Trecho 02”, foi executado com as mesmas dimensões (10 m de comprimento por 6,6 m de largura), espessuras de camadas e etapas do “Trecho 01”. Mas, neste caso, elas foram divididas em dois dias. No primeiro dia (13/07/2017) foi executada a escavação e remoção do pavimento existente, compactação do subleito, aplicação do material de sub-base (Brita 4A Natural), compactação da sub-base, aplicação do material de base (Brita Graduada Natural) e compactação da base (Figura 53). A base ficou exposta durante um dia à ação do tráfego e no dia seguinte (14/07/2017) foi realizada a imprimação com emulsão RM-1C e aplicação do CBUQ faixa especial para concluí-lo.

A quantidade de horas de trabalho dos maquinários foi o mesmo nos dois trechos executados, no entanto, no segundo trecho optou-se por dividir os trabalhos em dois dias para evitar que a massa asfáltica ficasse muito tempo no trecho esperando para ser aplicada. Isto também evita que algum imprevisto, como comentado anteriormente, pudesse atrasar a sua execução. Os parâmetros de umidade ótima e densidade seca foram fornecidos pelo laboratório da SMOP (Quadro

23) e verificados em campo. Para a compactação também foram utilizadas 9 passadas de rolo compactador do mesmo modelo utilizado no Trecho 01.

Os funcionários que participaram da execução do trecho fizeram observações quanto aos materiais utilizados no “Trecho 01” em relação ao “Trecho 02”. Do ponto de vista executivo, não notaram diferença entre um e outro, mas apontaram que o material natural aparentemente é mais resistente e melhor de trabalhar que o material reciclado.

FIGURA 53 – SEQUÊNCIA DA EXECUÇÃO DO TRECHO 02



FONTE: O Autor (2017)

Como o primeiro trecho foi executado antes e, ao lado do segundo, alguns funcionários se mostraram surpresos com a estabilidade do “Trecho01” após alguns dias da execução. Houve também relatos dos moradores próximos, segundo eles antes do reforço do pavimento, de que a passagem do ônibus gerava vibrações nas residências e que elas deixaram de se repetir. Apesar de ser uma impressão leiga, é um ponto que demonstra que houve sucesso na execução.

4.4.4 Medições Deflectométricas do pavimento

Antes da execução dos trechos foi realizada a medição da deflexão do pavimento para avaliar a sua situação (Figura 54). O ensaio de deflexão revela se o pavimento necessita de reforço estrutural ou não. Os pontos foram definidos de forma a abranger todos os pontos dos futuros trechos (bordo esquerdo, centro e bordo direito), totalizando 6 pontos por trecho.

FIGURA 54 – MEDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA ANTES DA EXECUÇÃO DOS TRECHOS



FONTE: O Autor (2017)

A análise deflectométrica inicial do pavimento (antes da construção dos trechos), denominada M01, revelou que o pavimento apresentava uma deflexão de projeto (D_p) mais de três vezes superior à deflexão admissível (D_{adm}) (Tabela 15). Nesta situação, a norma DNER nº 011 (DNER/1979) recomenda o reforço do trecho com base nos critérios deflectométricos ou de resistência (CBR). O dimensionamento dos trechos (item 4.2.4) considerou o critério da resistência (CBR), no entanto, para fins de comparação, caso fosse optado pelo critério deflectométrico, o reforço no pavimento, por exemplo para o Trecho 01, seria equivalente a 20,56 cm de CBUQ. Ou

seja, além de inviável economicamente (aumento de custos da ordem de 27%) o nível do revestimento da rua seria elevado consideravelmente, gerando transtornos aos usuários da via. A diferença de custos entre os dois métodos de reforço foi obtida pela comparação entre a opção de executar um reforço de toda a estrutura do pavimento (solução adotada) e de apenas aplicar um novo revestimento sem alterar a composição do pavimento atual.

Após a construção dos trechos, foram realizadas mais duas medições para avaliação, denominadas de M02 e M03. A M02 foi realizada em um período úmido, o que pode ter afetado os resultados, uma vez que a reconstrução do pavimento parecia não ter sido suficiente para promover uma deflexão dentro da aceitável. Balbo (2007), apontou como possíveis limitações da viga *Benkelman* a questão das condições climáticas no período de leitura das deflexões, desta forma, a M02 foi descartada. As leituras obtidas pela M03, realizadas em um período seco, mostraram que os reforços executados no pavimento, tanto no trecho de agregados reciclados de concreto quanto no de agregado natural, foram satisfatórios e apresentaram uma deformação de projeto menor que a admissível (Tabela 15). Também não foram verificadas diferenças significativas nas deformações entre os trechos, o que demonstra que tanto o material reciclado quanto o material natural têm apresentado bom comportamento.

TABELA 15 – MEDIÇÕES DEFLECTOMÉTRICAS - RESUMO

Trecho	D _{adm} (0,01 mm)	Dp – M01 (0,01 mm)	Deformação – M02 (0,01 mm) ⁽¹⁾	Deformação – M03 (0,01 mm)
01	101,6	365,1	175,3	35,7
02	101,6	337,5	150,7	34,8
03 ⁽²⁾	101,6	381,8	-	-

FONTE: O Autor (2017). (1). Medição descartada; (2) Trecho não executado

Além da análise deflectométrica, foi verificado visualmente que o pavimento encontra-se em ótimas condições de trafegabilidade, não apresentando trincas ou deformações plásticas (borrachudos).

4.5 CUSTOS E GANHOS AMBIENTAIS

4.5.1. Comparação de custos

A partir dos valores dos pregões eletrônicos realizados pela Prefeitura de Curitiba (disponíveis no portal *e-compras* do município) foi possível avaliar que houve ganhos econômicos com o uso dos agregados reciclados. A comparação foi feita com base na construção dos trechos executados na Rua Cidade de Ouro e apresentados ao longo do item 4.4.

Para a execução do “Trecho 01” foram gastos R\$ 5.999,61, com agregados reciclados de concreto contra R\$ 6.912,57 com agregados naturais no “Trecho 02”, considerando equipamentos, mão de obra e materiais. Este valor representa uma economia da ordem de 13,2% quando utilizado ARC. Extrapolando estes valores, pode-se verificar que para cada quilômetro (1.000 m) de via (considerando uma via de 7 m de largura) executado com agregado natural, seria possível pavimentar 1,15 quilômetro (1.152 m) de vias com agregado reciclado de concreto. A composição dos custos está apresentada no Apêndice 06. Considerando apenas os gastos com materiais de base e sub-base, a economia de materiais chegaria a 42,5%, uma vez que foram gastos R\$ 1.235,85 em agregados reciclados de concreto contra R\$ 2.148,81 de agregados naturais.

4.5.2 Ganhos ambientais

Estudos realizados pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Curitiba (SMMA) em parceria com duas empresas que recebem RCD para tratamento na região de Curitiba, no ano de 2014, mostraram que a composição do entulho coletado pela PMC é bastante variável. No total, foram analisadas 28 cargas considerando as duas empresas.

As cargas avaliadas estavam com diversos tipos de resíduos classificados como RCD: concretos, cerâmicas, madeiras, plásticos, solos, etc. A Figura 55 ilustra uma destas cargas. Nas imagens fornecidas pela SMMA, notou-se que os entulhos coletados são muito misturados. Isto dificulta a separação e pode inviabilizar sua utilização para outros fins, como no caso deste estudo, para as camadas de base de pavimentos (PINTO, 1999) (WEIL,2016).

FIGURA 55 - AMOSTRA DE CARGA RECEBIDA PARA ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DOS ENTULHOS NA CIDADE DE CURITIBA



FONTE: SMMA (2014)

As cargas recebidas pela primeira empresa totalizaram 49,2% de resíduos do tipo Classe A (cerâmica, concreto e pedras) e 50,8% das outras classes (madeira, plásticos, telhas de fibrocimento, rejeitos, vegetação, etc.). Na segunda empresa, a parcela representando os RCD tipo classe A totalizou 71,2%, enquanto as outras classes somaram 28,8% da massa das cargas recebidas. Estes valores são médias das cargas recebidas (Tabela 16).

Segundo contato telefônico com o representante da Associação dos Transportadores de Resíduos de Curitiba e Região (ACERTAR), as cargas de RCD seguem a proporção de 50% de resíduos Classe A e 50% de resíduos de outras classes, muito similar aos resultados encontrados nas cargas verificadas pela primeira empresa.

TABELA 16 – AMOSTRAS ANALISADAS DE RCD COLETADAS PELA PREFEITURA DE CURITIBA

Dados		Empresa 01	Empresa 02
Número de viagens analisadas		13	15
Resíduos Classe A	Média (%)	49,2	71,2
	Desvio Padrão (%)	14	14
Outras classes de RCD	Média (%)	50,8	28,8
	Desvio Padrão (%)	22	22

FONTE: O Autor (2017) com base em dados da SMMA (2014)

A SMMA forneceu dados sobre a geração total de entulhos na cidade de Curitiba desde o ano de 2013 até o mês julho de 2017 (Tabela 17). Considerando um cenário mais conservador, encontrado pela empresa 01 (49,2% de resíduos Classe A), estes dados de geração total foram convertidos em total de resíduos classe A

coletados pela PMC. Caso fossem transformados em agregados reciclados de construção civil provavelmente seriam enquadrados como do tipo misto (ARM). A média de geração no período foi de 18.376,62 ton de RCD Classe A.

TABELA 17 – TOTAL DE ENTULHOS COLETADOS PELA PMC 2013 – SET 2017 E ESTIMATIVA DE RESÍDUOS CLASSE A

Ano	2013	2014	2015	2016	2017 ⁽¹⁾
Coletado (ton)	30.698,38	30.949,11	37.409,42	44.531,51	43.165,85
Classe A (ton)	15.103,60	15.226,96	18.405,44	21.909,50	21.237,60

FONTE: O Autor (2017) com base nos dados fornecidos pela SMMA. ⁽¹⁾ até o mês de julho de 2017.

Nota-se que embora o país viva um momento de fragilidade econômica, o total de entulhos coletados tem apresentado crescimento ao longo dos anos (Tabela 17). Entre as hipóteses consideradas estão: uma maior dependência do poder público em situações deste tipo; a preferência por executar obras de reforma, que geram mais resíduos ao invés de novas construções; e o aumento dos descartes irregulares para evitar gastos com a contratação de caçambas particulares.

Além dos dados fornecidos pela SMMA, que representam um retrato apenas do material que é coletado pela Prefeitura em áreas de descartes irregulares ou pequenas quantidades de entulhos (até 0,5 m³) solicitadas via central 156, foram obtidos dados do Plano de Logística Reversa elaborado pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do Paraná (SENAI-PR) em parceria com o Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado do Paraná (SINDUSCON-PR) no ano de 2014 (SENAI-PR, 2014). Este relatório foi baseado em dados fornecidos pelas construtoras do estado filiadas ao Sindicato e representa um universo maior de geração de resíduos da construção. Os dados apresentados referem-se apenas à Região de Curitiba.

O levantamento apontou um total de 68.787 toneladas de RCD gerado pelas 953 empresas cadastradas no SINDUSCON-PR. Este valor foi extrapolado para as 2.792 construtoras existentes em Curitiba e região na época, totalizando 201.524 toneladas. Foi excluído deste valor a quantidade de material classificada como “solos”, pois representaria uma parcela significativa (mais de 50%) e, também, por ser geralmente destinada para execução de aterros. Desta forma, desconsiderando o volume de solo, os RCD classe A representariam 75,1% do material gerado nos canteiros de obra (Tabela 18).

TABELA 18 – RESÍDUOS GERADOS NOS CANTEIROS DE OBRA DA REGIÃO DE CURITIBA-PR

Resíduo	Total (953 empresas)	Total ⁽¹⁾ (2.792 empresas)	%
Classe A ⁽²⁾	51.560	151.320	75,1
Classe B	11601	33.987	16,9
Classe C	2.751	8.060	4,0
Classe D	2.784	8.156	4,0
Total	68.787	201.524	100,0

FONTE: Adaptado de SENAI (2014) ⁽¹⁾ Extrapolação para as 2.792 empresas na região de Curitiba. ⁽²⁾ Não considera a geração de solo como resíduo

Em uma situação hipotética na qual fossem somados os dados fornecidos pela SMMA (em termos médios) e pelo SINDUSCON-PR, considerada a utilização de 70% dos RCD Classe A em construção de vias e tendo como base a taxa de consumo de agregado/m² de pavimento verificado no “Trecho 01”, seria possível construir 31,29 km de vias (considerando uma via de largura de 7 m) (Quadro 23). Além dos ganhos ambientais com a retirada destes materiais do meio ambiente, se alcançaria uma economia de R\$ 3.030.058,56 para os cofres públicos - quando comparado com o custo desta mesma extensão com apenas agregados naturais. Em termos de comparação: Curitiba apresentava em 2011 aproximadamente 376,5 km de vias de revestimento em saibro (IPPUC, 2012).

QUADRO 23 – CONVERSÃO DOS VALORES GERADOS DE RCD EM CURITIBA-PR EM QUILOMETROS DE VIAS

Classe A – SENAI-PR (2014)	151.320,00 ton/ano
Classe A - SMMA (2014)	17.661,38 ton/ano
Total	168.981,38 ton/ano
70% do total gerado	118.286,96 ton/ano
Utilização de AR/m ² de pavimento	0,54 ton/m ²
Área de pavimentos	219.049,93 m ²
Extensão (via de 7 m de largura)	31,29 km
Custo/km de pavimento com Ag. Reciclado	R\$ 636.322,76/km
Custo/km de pavimento com Ag. Natural	R\$ 733.151,87/km
Economia para 31,29 km	R\$ 3.030.058,56

FONTE: O Autor (2017)

Este cenário é uma situação hipotética, pois segundo a norma NBR nº 15.116 (ABNT, 2004), a utilização de agregados reciclados é restrita às vias de tráfego leve

ou médio. Outra situação que impacta na quantidade de material a ser utilizado é o dimensionamento diferenciado que cada local exige, em função da resistência do terreno em que o pavimento será assentado. Um cenário em que 70% dos RCD Classe A fossem utilizados é inimaginável para o momento, mas ele deve ser perseguido no futuro.

A capacidade de processamento das duas empresas que forneceram agregados reciclados para estudo é de 8.800 m³/mês ou 105.600 m³/ano e, considerando-se uma densidade média de 1,46 ton/m³ no estado solto (valor encontrado neste estudo para o ARM), a capacidade anual seria de 154.176 ton. Ou seja, seria possível tratar 91,2% do RCD classe A gerado.

Soma-se aos dados financeiros o fato da Prefeitura ter enviado para aterro sanitário, em média, 17.661,38 toneladas de resíduos classe A por ano (considerando o período entre 2013 e 2016, anos com dados completos), a um custo de R\$ 70,79/tonelada (dados fornecidos pela SMMA para o ano de 2017), o que gera uma despesa da ordem de R\$ 1.250.249,09/ano. O valor para recebimento deste material na empresa B, por exemplo, varia de acordo com as características do RCD recebido. Quanto mais “limpo” estiver o material, mais barata é sua destinação (Tabela 19).

Do ponto de vista ambiental, o envio deste tipo de material para aterro sanitário diminui sua vida útil e inutiliza um recurso que poderia ser aplicado no reforço de base de vias, construção de ciclovias, manutenção de vias de revestimento primário e na construção de novas ruas.

TABELA 19 – VALORES PARA RECEBIMENTO DE MATERIAIS – EMPRESA B

Material	Cargas 12,0 m ³	Custo/m ³	Custo/ton
Concreto 100% limpo	0,00	0,00	0,00
Caliça limpa cimentícia	90,00	7,50	11,18 ⁽²⁾
Caliça limpa cerâmica	100,00	8,33	12,16 ⁽³⁾
Material com ferragem ou terra	350,00	29,17	37,38 ⁽⁴⁾
Caliça cimentícia/cerâmica com até 20% de rejeito ⁽¹⁾	200,00	16,67	21,34 ⁽⁴⁾
Caliça cimentícia/cerâmica de 21 até 50% de rejeito ⁽¹⁾	450,00	37,50	48,00 ⁽⁴⁾
Caliça cimentícia/cerâmica de 51 até 100% de rejeito ⁽¹⁾	850,00	70,83	90,66 ⁽⁴⁾

FONTE: Com base nos dados fornecidos pela Empresa B (2016). ⁽¹⁾ Entende-se por rejeito materiais como gesso, terra, vidros, pneus, manta asfáltica, classe C em geral, lixo orgânico, recicláveis misturados. ⁽²⁾ Considerando-se uma densidade no estado solto de 1,49 ton/m³ (este trabalho). ⁽³⁾ Considerando-se uma densidade de 1,46 ton/m³ (este trabalho). ⁽⁴⁾ Considerando-se uma densidade média de 1,28 ton/m³ (TESSAROLO, 2012)

No entanto, o custo para enviar entulhos para aterro se mostra mais vantajoso do que o envio para reciclagem quando o RCD está altamente contaminado por rejeitos (51 até 100%) (Figura 56). Curiosamente, esta é a situação apontada no estudo realizado pela SMMA em parceria com a empresa 01 da Região de Curitiba, na qual aproximadamente 51% dos entulhos coletados são de outras classes (Tabela 16). Ou seja, considerado o cenário atual, é economicamente mais vantajoso para a Prefeitura Municipal enviar estes resíduos para aterro. Porém, caso houvesse uma conscientização da população, difundindo políticas de educação ambiental e a separação dos resíduos de construção e demolição, seria possível reduzir em até 82,8% os custos da Prefeitura com envio de RCD Classe A para aterro (considerando o valor de R\$70,79/ton enviado para aterro e R\$ 12,16/ton o custo para destinação de material 100% cerâmico).

FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DE CUSTOS PARA DESTINAÇÃO PARA ATERRO X RECICLAGEM



FONTE: O Autor (2017) com base em SMMA (2017) e Empresa B (2016)

Qualquer iniciativa na busca por diminuir a disposição destes materiais em aterros é válida. Outras medidas devem ser tomadas visando a minimização ou não geração destes resíduos nos canteiros de obras, como a adoção de políticas de redução de desperdício. Após sua geração, os RCD não devem ser misturados antes da destinação para processos de reciclagem. Essa ação amplia o uso destes materiais, uma vez que a separação nas usinas de reciclagem, segundo os técnicos, é complicada e acaba por inviabilizar o uso de uma parcela maior destes resíduos em outras aplicações, como a pavimentação.

5 CONCLUSÕES

Três empresas recicladoras de RCD foram encontradas na região de Curitiba, sendo que apenas duas demonstraram interesse em fornecer o material. A empresa que produz ARC tem sido fornecedora da PMC e a empresa que produz ARM se dispôs a fornecer materiais para os ensaios. No entanto, a quantidade enviada não foi suficiente para a realização do teste de campo, pois a empresa alegou não dispor do material no momento. Além de inviabilizar a construção do trecho, esta situação também levanta a questão de confiabilidade do produtor fornecer o material, que teoricamente é gerado em larga escala.

O estudo preliminar de uso de ARC revelou que ele pode ser aplicado em bases e sub-bases de pavimentos, base de ciclovias e em vias de revestimento primário, desde que alguns cuidados referentes à umidade e compactação sejam observados, como por exemplo, não executar camadas em dias com probabilidade de chuvas intensas. O uso de ARC, do tipo Brita Graduada, para compor o revestimento de um Tratamento Superficial Betuminoso foi descartada devido à grande quantidade de pó entre os agregados graúdos, dificultando a adesividade do ligante asfáltico e comprometendo a estabilidade do pavimento.

Os ensaios laboratoriais de caracterização dos agregados reciclados identificaram que, por sua granulometria, o ARC estudado se enquadrava como Brita Graduada Reciclada de Concreto (BGRC) e que este material atende aos requisitos exigidos nas normas brasileiras para uso em base de pavimentos. Um primeiro lote de ARM foi reprovado devido à grande quantidade de materiais contaminantes (plásticos, madeiras, solo, etc.) e um segundo lote (substituindo o material do primeiro) apresentou-se com potencial uso em camadas de sub-base de pavimentos, sendo classificado como Brita 4A Reciclada Mista (B4RM). O ARM não foi aprovado no ensaio de Abrasão Los Angeles, no entanto, este ensaio não é exigido na principal Norma Brasileira e fica como sugestão a retirada deste requisito ou sua substituição nas normas da PMC, de modo que possam ser atendidas as exigências da Prefeitura Municipal de Curitiba na compra de agregados reciclados de RCD.

O Lote reprovado fortalece a estatística de que apenas 23% das usinas controlam por meio de ensaios o material que produzem, o que contribui para o preconceito em utilizar os agregados reciclados.

Para a energia intermediária (26 golpes), a umidade ótima encontrada para o ARC foi de 13,7% para uma massa específica seca máxima de 1,792 g/cm³. O CBR médio para o ponto de umidade ótima foi 78,04%, com desvio padrão de 14,82% e expansão inferior a 0,5%, confirmando que pode ser utilizado como base de pavimentos (CBR > 60%). Também analisado pela energia intermediária, o ARM apresentou umidade ótima de 9,5% para uma massa específica seca máxima de 1,806 g/cm³. O CBR médio foi de 64,16%, com desvio padrão de 20,46% e expansão inferior a 1,0%, confirmando que pode ser utilizado como sub-base de pavimentos (CBR > 20%). Os valores condizem com estudos de outros autores.

A análise do CBR é crítica em relação ao preparo e à distribuição dos fragmentos no cilindro porque a amostra pode conter maior ou menor quantidade de pedregulhos. Isto foi confirmado pela grande dispersão de dados repetidos, bem como por análise de imagem após o desmonte deles.

A baixa dispersão do experimento estrela no ponto central forneceu um bom modelo de análise da umidade e energia, permitindo prever o ponto ótimo de energia (47) e umidade (10,1%). A expansão em todos os corpos de prova analisados foi inferior a 0,5%, e neste parâmetro, os dados estatísticos não permitiram uma boa previsão dos valores. A utilização de planejamento estrela em substituição aos testes univariados mostrou-se interessante, mas a grande quantidade de corpos de prova pode ser um empecilho para a adoção do método.

A construção dos trechos em campo foi realizada na rua Cidade de Ouro, onde o tráfego é considerado médio e o CBR do sub-leito era conhecido. A construção do primeiro trecho consumiu um dia de trabalho e foi executado com tempo firme. Os funcionários demonstraram maior confiança na aplicação do material e os moradores se mostraram interessados e incentivaram a utilização de agregados reciclados na construção de pavimentos. O segundo trecho, considerado de controle por ter sido executado com agregados naturais, foi executado em dois dias de trabalho, também sob tempo bom. Os parâmetros exigidos em projeto, como umidade variando entre $\pm 1,5\%$ da umidade ótima e grau de compactação de 100% foram atingidos com a passagem de 9 ciclos do rolo compactador.

Ensaio preliminares do pavimento, com auxílio da viga Benkelman, mostraram que o pavimento necessitava de reforço estrutural. Ensaio posteriores às execuções dos trechos comprovaram que o material reciclado aplicado foi adequado

para melhorar a resistência do pavimento e que seu desempenho pode ser comparado com o trecho executado com agregado natural.

A análise simplificada de custos identificou uma economia de 13,2% com o uso de agregados reciclados em relação aos agregados naturais, considerando mão de obra, equipamentos e materiais e um ganho de 42,5% se considerados apenas os materiais.

O estudo realizado pela SMMA em parceria com duas empresas recicladoras de RCD na região de Curitiba, revelou que os resíduos Classe A (concretos, cerâmicas, rochas, etc.) variam de 49,2 a 71,2% do total coletado pela PMC. Os dados obtidos de geração de RCD na região de Curitiba, por meio da SMMA e do estudo do SENAI em parceria com o SINDUSCON, demonstram que em 2014 foram gerados 168.981,38 ton de RCD Classe A. Se utilizado 70% desse montante, seria possível construir em 31,29 km de vias de tráfego leve ou médio e geraria uma economia de R\$ 3.0303.058,64. Além disso, a PMC gasta anualmente, em média, R\$ 1.250.249,09 para destinar RCD Classe A para aterro, este valor poderia ser reduzido em até 82,8% com a separação dos resíduos antes da coleta e envio para tratamento, o que evidencia a necessidade de ampliar as políticas de conscientização e educação ambiental junto à população.

Alguns pontos precisam ser melhorados para ampliar a utilização de agregados reciclados, como ampliar o controle do material produzido, no caso do ARM, e incentivar a separação dos resíduos gerados nos canteiros de obra.

Conclui-se que os resíduos produzidos e comercializados na região de Curitiba se apresentam adequados para o uso em pavimentos e que sua utilização traz ganhos econômicos e ambientais. Como sugestão para estudos futuros, está a elaboração de um plano de utilização de agregados reciclados para obras no município de Curitiba e um plano de incentivo à separação de RCD nos canteiros de obra.

REFERÊNCIAS

ARAUJO C. B.; NOGUEIRA, T. P.; GONÇALVES, A. C.; GURJÃO T. H.; CAVALCANTE, L. P.; JUNIOR, K. P.; GOMES M. C. **Análise da Utilização de Resíduos de Construção e Demolição em Sub-Bases de Pavimentos em Vias Urbanas de Fortaleza/CE – Estudo de Caso**. Trabalho apresentado na 20ª Reunião De Pavimentação Urbana, Florianópolis, 2017.

AMORIM, E.F.; **Viabilidade Técnica Econômica de Misturas de Solo-RCD em camadas de base de Pavimentos Urbanos**. Estudo de Caso: Município de Campo Verde – MT. 173 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ANGULO S. C.; JOHN V. M. **Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. Relatório técnico.

ARIF, M.; BENDI, D.; TOMA-SABBAGH, T. Construction waste management in India: an exploratory study. **Construction Innovation**, Manchester, v. 12, n. 2, p. 133-155, 2012.

ARULRAJAH A.; PIRATHEEPAN J.; DISFANI M. M. Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 26, n. 2, p.349-357, fev. 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000850. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000850>> Acesso em: 04 out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil - 2014**. São Paulo, 2014. Relatório Técnico. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15116 (ABNT, 2004): Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7182: Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7809**: Determinação do Índice de Forma pelo método do Paquímetro. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9895**: Solo – Índice de Suporte Califórnia, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11.806**: Materiais para base e sub-base de brita graduada, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). **Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015**. São Paulo, 2015 Disponível em: <https://issuu.com/amandadiaspais/docs/relatorio-pesq2015_abrecon-read>. Acesso em: 05 out. 2016.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Campinas, Editora da Unicamp, 2001.

BASTEN, M. **Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012**. Berlim: Kreislaufwirtschaft Bau, 2015. Relatório técnico.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BRASIL. **Resolução nº 307**, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Legislação Federal, Brasília, 17 julho 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>> Acesso em: 01 out. 2016.

BRASIL. **Resolução nº 348**, de 17 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA no 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Legislação Federal, Brasília, 17 agosto 2004. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=449>> Acesso em: 01 out. 2016.

CAMARA MEXICANA DE LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – CMIC. **Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición**. México. 2013. Relatório Técnico Disponível em: <<http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf>> Acesso em: 18 mai. 2017.

CARNEIRO, A.P.; BURGOS, P.C.; ALBERTE, E. P. V. Uso de agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos In: **Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA / Caixa Econômica Federal, 2001. p 188-227.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (CNT). **Boletim Estatístico – Outubro 2016**. Disponível em <<file:///C:/Users/Paulo/Downloads/Boletim%20Estat%20C3%ADstico%20-%2010%20-%202016.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

COSTA, L.C.S.; DI CASTRO, A. P.; REZENDE, L.R. **Avaliação do Desempenho de um pavimento executado com RCD após quatro anos de funcionamento**. Trabalho apresentado no COBRAMSEG 2010: Engenharia Geotécnica para o Desenvolvimento, Inovação e Sustentabilidade, Gramado, 2010.

DELOITTE S.A. **Construction and Demolition Waste Management in Germany - 2015**. London, 2015 em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/deliverables/CDW_Germany_Factsheet_Final.pdf>. Acesso em: 02 out. 2016.

DEPARTMENT OF THE ENVIROMENT AND ENERGY – DEE. Management of Construction and Demolition Waste in Australia. Austrália. 2011. Relatório Técnico. Disponível em <<http://www.environment.gov.au/system/files/resources/323e8f22-1a8a-4245-a09c-006644d3bd51/files/construction-waste.pdf>> Acesso em: 18 mai. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 035**: Agregados - Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 054**: Equivalente de Areia. Rio de Janeiro, 1997a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 081**: Agregados - Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo. Rio de Janeiro, 1998c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 083**: Agregados - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 084**: Agregado miúdo - Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro, 1995a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 088**: Solos – Determinação da umidade pelo método expedito do álcool. Rio de Janeiro, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 092**: Solos – Determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 120:** Agregados – Coleta de Amostras - Procedimentos. Rio de Janeiro, 1997b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 152:** Agregados em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1995b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 11:** Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 398:** Índice de degradação após compactação Proctor - IDP. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro, 1981, 34 p. Disponível em http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/667_metodo_de_projeto_de_pavimentos_flexiveis.pdf Acesso em: 15 out 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **008:** Levantamento Visual Contínuo para Avaliação da Superfície de Pavimentos Flexíveis, Rio de Janeiro, 2003a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **009:** Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semirrígidos, Rio de Janeiro, 2003b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **011:** Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis, Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **139:** Especificação de sub-bases estabilizadas granulometricamente – Especificação de Serviço, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **133:** Pavimentação Asfáltica - Delineamento da Linha de Influência Longitudinal da Bacia de Deformação por Intermédio da Viga Benkelman, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **141:** Especificação de bases estabilizadas granulometricamente – Especificação de Serviço, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **147:** Especificação de execução de tratamentos superficiais duplos, Rio de Janeiro, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação.** 3 ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

EDINÇLILER A.; BAYKAL G.; DENGILI K. G. Determination of static and dynamic behavior of recycled materials for highways. **Resources, Conservation & Recycling**. v. 42, n.2, p. 223-237, Fev. 2004. DOI:10.1016/j.resconrec.2004.04.003.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Advancing Sustainable Materials Management: 2014 Fact Sheet**. Washington. EPA, 2016. Relatório Técnico. Disponível em <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/2014_smmfactsheet_508.pdf>. Acesso em: 07 de set. de 2017.

EUROPEAN COMMISSION – EC. **Service Contract On Management Of Construction And Demolition Waste – SR1**. Fev. 2011. Disponível em <http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf> Acesso em: 18 de mai. de 2017.

EUROPEAN COMMISSION – EC. **Waste**. Disponível em <http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm> Acesso em 30 dez. 2016.

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**. 193 f. Tese (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FLATOUT. Disponível em: <https://www.flatout.com.br/cinco-fatores-que-tornam-o-asfalto-brasileiro-tao-ruim/> Acesso em: 13 set. 2017;.

Google Maps, Acesso em: 18 fev. 2016 – Foto do pavimento de concreto.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do Comportamento de um Agregado Reciclado de Concreto para Utilização na Construção Rodoviária**. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

HORTEGAL, M.V; FERREIRA, T.C.; SANT'ANA, V.C. Utilização de Agregados Resíduos Sólidos da Construção Civil para Pavimentação em São Luís – MA. *Revista Pesquisa em Foco*, v. 17, n.2, p. 60-74, 2009.

IMTEAZ, A. I; ALI, Y. MM.; ARULRAJAH A. Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material. **Waste Management & Research**. v. 30, n. 9, p.917-921, 2012. DOI: 10.1177/0734242X12448512.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8>. Acesso em: 10 out. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico Dos Resíduos Sólidos Da Construção Civil**. Brasília, 2012. Relatório Técnico. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf>. Acesso em: 02 out. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA. **Curitiba em Dados**. Disponível em <[http://curitibaemdados.ippuc.org.br/Curitiba em dados Pesquisa.htm](http://curitibaemdados.ippuc.org.br/Curitiba_em_dados_Pesquisa.htm)>. Acesso em: 15 out 2016.

LEITE, F. C. **Comportamento Mecânico de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil em Camadas de Base e Sub-Bae de Pavimentos**. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LIMA, A. P.; **Obras de Terra**. Rio de Janeiro: UVA, 2013. Relatório Técnico. Disponível em <https://pt.slideshare.net/thiagolf7/02-compactao-dos-solos?qid=2c94b1f7-a8e5-4b1b-9dea-57596b6e6f18&v=&b=&from_search=1>. Acesso em: 08 mar 2017.

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

MARIANO, L. S. **Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil com Reaproveitamento Estrutural: Estudo de Caso de uma Obra com 4.000 m²**. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MATTIETO, R.A.; MATTA, V.M. Utilização de um Delineamento Composto Central Rotacional para Avaliação Microbiológica de Polpas de Açaí Pasteurizadas. Trabalho apresentado no XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Búzios, 2012.

MIRANDA, L. F. R. **Contribuição ao Desenvolvimento da Produção e Controle de Argamassas de Revestimento com Areia Reciclada Lavada de Resíduos Classe A da Construção Civil**. 473 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO S. C.; CARELI E. D. A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p.57-71, jan./mar. 2009.

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

MOTTA, R. S., **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

NELLES, M.; GRÜNES, J.; MORSCHEK, G.. Waste Management in Germany - Development to a Sustainable Circular Economy? **Procedia Environmental Sciences**, Leipzig, v. 35, n. 1, p.6-14, jan. 2016.

NOBREGA, R.D; MELO, R.A. **Uso de Agregados de Resíduos da Construção Civil na Pavimentação Urbana em João Pessoa**. Trabalho Apresentado no Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção – ENARC, Feira de Santana, 2009.

OIKONOMOU, N. D. **Recycled Concrete Aggregates. Cement & Concrete Composites**. Thessaloniki, v. 27, n. 2, p. 315-318, feb. 2005.

PAPPU, A.; SAXENA, M.; ASOLEKAR, S. R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. **Building and Environment**. Bombay, v. 42, p. 2311-2320, 2007. DOI 10.1016/j.buildenv.2006.04.015.

PETKOVIC, G.; ENGELSEN C. J.; HÅØYA A.; BREEDVELD G. Environmental impact from the use of recycled materials in road construction: method for decision-making in Norway. **Resources, Conservation and Recycling**. Oslo. v. 42 n. 1, p. 249-264, feb. 2004. DOI 10.1016/j.resconrec.2004.04.004.

PIMENTEL, U. H. O. **Análise da geração de resíduos da construção civil da cidade de João Pessoa-PB**. 190 p. Tese (doutorado) – UFPB E UFBA, Salvador, 2013.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**.3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, T. de P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. 190 p. Tese (doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

Portal de Compras da Prefeitura de Curitiba. Disponível em: <http://www.e-compras.curitiba.pr.gov.br/>. Acesso em: 16 fev. 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. **021: Pavimento Flexível – Sub-base – Especificação de Serviço**. Curitiba, 1999.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. Decreto 852 de 15 de agosto de 2007. Dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil classe a, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas, contratadas pelo município de Curitiba. Curitiba. 15 de agosto de 2007. Disponível em <multimedia.curitiba.pr.gov/2010/00086363.pdf> Acesso em: 02 abr. 2016.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. Decreto 1.066 de 25 de setembro de 2006. "Regulamenta a Lei N.º 11.596/2005 e estabelece critérios para a construção ou reconstrução de passeios nos locais que especifica. Curitiba. 25 de setembro de 2006. Disponível em <<http://multimedia.curitiba.pr.gov.br/2017/00203833.pdf>> Acesso em: 16 jun. 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. Lei 11.095 de 08 de julho de 2004. Dispõe sobre as normas que regulam a aprovação de projetos, o licenciamento de obras e atividades, a execução, manutenção e conservação de obras no Município e dá outras providências. Curitiba. 08 de julho de 2004. Disponível em <<http://multimedia.curitiba.pr.gov.br/2010/00084620.pdf>> Acesso em: 16 jun. 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. Termo de referência para aquisição de agregados reciclados. Curitiba, 2015.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO – PMSP. ETS 001: camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil. São Paulo, 2003.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO – PMSP. IP 002: Classificação da Vias. São Paulo, 2004a.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO – PMSP. IP 004: Dimensionamento de pavimentos para tráfego leve. São Paulo, 2004b.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. Planilha de Dimensionamento de Pavimentos. São Paulo, 2004c. Disponível em <https://goo.gl/qbshco> Acesso em: 15 out 2016.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 50, n. 1, p.71-81, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.010>.

RESPLANDES, H. M. S. **Estudo Ambiental e Mecânico da Aplicação do Agregado Reciclado na Estrutura de Pavimentos Flexíveis.** 212f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Do Meio Ambiente, Universidade Federal De Goiás, Goiânia, 2007.

SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE – SMMA. **Análise de composição de entulhos coletadas pela PMC.** 2014. No prelo.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL PARANÁ – SENAI-PR. **Plano de Logística – 2014**. Curitiba, 2014. Relatório Técnico.

SCHNEIDER, D. M; **Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo**. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, C. A. R. **Estudo do Agregado Reciclado de Construção Civil em Misturas Betuminosas para Vias Urbanas**. 220 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

TESSAROLO, A. B.; SÁ, J. C.; SCREMIN L. B. Quantificação e classificação dos resíduos da construção civil e demolição no município de Pelotas, RS. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n.2, jun-2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212012000200008>. Acesso em: 24 set. 2017.

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

ULSEN, C.; KAHN, H.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M.; HAWLITSCHKE, H. Separabilidade de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição de diferentes origens. **HOLOS**, vol. 3, 2014, pp. 341-348. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Natal, Brasil. Disponível em <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481547172040> . Acesso em: 06 set. 2017.

WANG J.; LI Z.; TAM, V. W.V., Critical factors in effective construction waste minimization at the design stage: A Shenzhen case study, ChinaJiayuan. **Resources, Conservation and Recycling**. Penrith, v. 82, p. 1-7. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.003>.

WEIL, M. Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. **Waste Management & Research**, [s.l.], v. 24, n. 3, p.197-206, 1 jun. 2006. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x06063686>.

APÊNDICE 01 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE CARACTERIZAÇÃO

ENSAIO DE COMPOSIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO MISTO – LOTE 01

Material: Agregado Reciclado Mistto (ARM)											
Data: 10 e 11/01/2017											
Local do Ensaio: Laboratório SMOP											
Normas: NBR 15116/2004 - Anexo A											
Grupo	Amostra 01		Amostra 02		Amostra 03		Média		Desvio Padrão		
	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	
01 - Cimento	12650	50,2%	12600	49,4%	13100	52,0%	12783	50,5%	275	1,4%	
02 - Rochas	5170	20,5%	5550	21,7%	4800	19,1%	5173	20,4%	375	1,3%	
03 - Cerâmica	5530	21,9%	5800	22,7%	5470	21,7%	5600	22,1%	176	0,5%	
04 - Outros	1860	7,4%	1580	6,2%	1800	7,2%	1747	6,9%	147	0,6%	
Total	25210	100,0%	25530	100,0%	25170	100,0%	25303	100,0%	197	-	

Situação: reprovado (Outros: maior que o requisito da NBR 15116/2004 = 3%)

ENSAIO DE COMPOSIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO MISTO – LOTE 02

Material: Agregado Reciclado Mistto (ARM)											
Data: 25/05/2017											
Local do Ensaio: Laboratório SMOP											
Normas: NBR 15116/2004 - Anexo A											
Grupo	Amostra 01		Amostra 02		Amostra 03		Média		Desvio Padrão		
	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	
01 - Cimento	10560	43,2%	9900	40,6%	10250	42,7%	10237	42,2%	330	1,4%	
02 - Rochas	7030	28,7%	8040	33,0%	7060	29,4%	7377	30,4%	575	2,3%	
03 - Cerâmica	6570	26,9%	6150	25,2%	6420	26,7%	6380	26,3%	213	0,9%	
04 - Outros	300	1,2%	280	1,1%	290	1,2%	290	1,2%	10	0,0%	
Total	24460	100,0%	24370	100,0%	24020	100,0%	24283	100,0%	232	0	

Situação: aprovado

ENSAIO DE GRANULOMETRIA DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Material:	Brita Graduada Reciclada de Concreto (ARC)				
Data:	23/09/2017				
Local do Ensaio:	Laboratório SMOP				
Normas:	DNIT 083/1998, DNIT 139/2010, DNIT 141/2010 e Normas internas PMC				
Granulometria - AMOSTRA 01 - 23 de setembro de 2016					
Peneira	Peneira	Retido	Passando	% Parcial	% Total
2"	50	0	10255,4	0,00%	100,00%
1"	25	0	10255,4	0,00%	100,00%
3/8"	9,5	3120	7135,4	30,42%	69,58%
N 4	4,8	1200	5935,4	11,70%	57,88%
Fundo Grosso				0,00%	0,00%
N 10	2	1789,2	4146,2	17,45%	40,43%
N 40	0,42	2932,1	1214,1	28,59%	11,84%
N 200	0,075	1141,3	72,8	11,13%	0,71%
Fundo Fino		72,8	- 0,00	0,71%	0,00%
Total		10255,4	-	100,00%	-
Granulometria - AMOSTRA 02 - 23 de setembro de 2016					
Peneira	Peneira	Retido	Passando	% Parcial	% Total
2"	50	0	10494,1	0,00%	100,00%
1"	25	60	10434,1	0,57%	99,43%
3/8"	9,5	3250	7184,1	30,97%	68,46%
N 4	4,8	1280	5904,1	12,20%	56,26%
Fundo Grosso				0,00%	0,00%
N 10	2	1741,8	4162,3	16,60%	39,66%
N 40	0,42	2724,4	1437,9	25,96%	13,70%
N 200	0,075	1288,5	149,4	12,28%	1,42%
Fundo Fino		149,4	-	1,42%	0,00%
Total		10494,1	-	100,00%	-
Granulometria - AMOSTRA 03 - 23 de setembro de 2016					
Peneira	Peneira	Retido	Passando	% Parcial	% Total
2"	50	0	10858,8	0,00%	100,00%
1"	25	100	10758,8	0,92%	99,08%
3/8"	9,5	3090	7668,8	28,46%	70,62%
N 4	4,8	1260	6408,8	11,60%	59,02%
Fundo Grosso				0,00%	0,00%
N 10	2	1773,3	4635,5	16,33%	42,69%
N 40	0,42	3145,3	1490,2	28,97%	13,72%
N 200	0,075	1428,3	61,9	13,15%	0,57%
Fundo Fino		61,9	-	0,57%	0,00%
Total		10858,8	-	100,00%	-

Obs: Material se enquadra na FAIXA A, segundo a norma DNIT 141/2010 (DNIT, 2010)

ENSAIO DE GRANULOMETRIA DO AGREGADO RECICLADO MISTO – LOTE 02

Granulometria - AMOSTRA 01 - 25 de maio de 2017					
Peneira	Peneira	Retido	Passando	% Parcial	% Passante
3"	75	1910	44480	4,12%	95,88%
2 1/2"		2740	41740	5,91%	89,98%
2"	50	3590	38150	7,74%	82,24%
1 1/2"		4040	34110	8,71%	73,53%
1"	25	3680	30430	7,93%	65,60%
3/4"	19,5	2980	27450	6,42%	59,17%
1/2"	12,5	3780	23670	8,15%	51,02%
3/8"		1690	21980	3,64%	47,38%
N 4	4,8	3400	18580	7,33%	40,05%
Fundo Grosso		18580			
N 10	2	4150	14430	8,95%	31,11%
N 40	0,42	8990	5440	19,38%	11,73%
N 200	0,075	5100	340	10,99%	0,73%
Fundo Fino		340	0	0,73%	0,00%
Total		46390	-	100,00%	-
Granulometria - AMOSTRA 02 - 25 de maio de 2017					
Peneira	Peneira	Retido	Passando	% Parcial	% Passante
2 1/2"		2650	41640	5,73%	89,72%
2"	50	3600	38040	7,79%	81,93%
1 1/2"		4080	33960	8,83%	73,10%
1"	25	3720	30240	8,05%	65,05%
3/4"	9,5	3100	27140	6,71%	58,34%
1/2"	12,5	3540	23600	7,66%	50,68%
3/8"		1750	21850	3,79%	46,89%
N 4	4,8	3200	18650	6,92%	39,97%
Fundo Grosso		18470		39,97%	
N 10	2	4200	14450	9,09%	30,88%
N 40	0,42	8750	5700	18,94%	11,95%
N 200	0,075	5200	500	11,25%	0,69%
Fundo Fino		320	180	0,69%	0,00%
Total		46210	-	100,00%	-
Granulometria - AMOSTRA 03 - 25 de maio de 2017					
Peneira	Peneira	Retido	Passando	% Parcial	% Passante
3"	75	1870	44520	4,07%	97,01%
3"	75	1870	44520	4,07%	97,01%
2 1/2"		2630	41890	5,73%	91,28%
2"	50	3720	38170	8,11%	83,18%
1 1/2"		4000	34170	8,72%	74,46%
1"	25	3810	30360	8,30%	66,16%
3/4"	9,5	1900	28460	4,14%	62,02%
1/2"	12,5	3710	24750	8,08%	53,93%
3/8"		1520	23230	3,31%	50,62%
N 4	4,8	3270	19960	7,13%	43,50%
Fundo Grosso		19460			
N 10	2	3990	15970	8,69%	34,80%
N 40	0,42	10010	5960	21,81%	12,99%
N 200	0,075	5170	790	11,27%	1,72%
Fundo Fino		290	500	0,63%	1,09%
Total		45890	-	100,00%	-

Obs: O material se enquadra na faixa granulométrica da Brita 4A segundo norma PMC-ES 021/99

ENSAIO DE EQUIVALENTE DE AREIA DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Material:	Brita Graduada Reciclada de Concreto (ARC)				
Data:	27/04/2016				
Local do Ensaio:	Laboratório SMOP				
Normas:	DNER 054/1997				
Equivalência de areia					
Amostra	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média	Desvio Padrão
Leitura Argila (cm)	23,2	25,8	25	24,7	1,3317
Leitura Areia (cm)	11	11	11	11,0	0,0000
Equivalência de areia	47,4%	42,6%	44,0%	45,0%	-

Situação: Aprovado

ENSAIO DE EQUIVALENTE DE AREIA DO AGREGADO RECICLADO MISTO – LOTE 02

Material:	Agregado Reciclado Misto (ARM)				
Data:	26/05/201				
Local do Ensaio:	Laboratório SMOP				
Normas:	DNER 054/1997				
Equivalência de areia					
Amostra	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média	Desvio Padrão
Leitura Argila (cm)	20,10	20,50	21,00	20,5	0,45
Leitura Areia (cm)	8,30	8,40	8,60	8,5	0,15
Equivalência de areia	41,29%	40,98%	40,95%	41,07%	-

Situação: Aprovado

ENSAIO DE EQUIVALENTE DE AREIA DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	0,00
Massa Final	2650,00	2650,00	2600,00	2633,33	28,87
LA	47,00%	47,00%	48,00%	47,33%	0,58%

Situação: Aprovado (LA<50%)

ENSAIO DE EQUIVALENTE DE AREIA DO AGREGADO RECICLADO MISTO – LOTE 02

	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	0,00
Massa Final	1900,00	1950,00	1800,00	1883,33	76,38
LA	62,00%	61,00%	64,00%	62,33%	1,53%

Situação: Reprovado (LA>50%)

APÊNDICE 02 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE COMPACTAÇÃO, ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC ou CBR) E EXPANSÃO

AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO – ARC

AGREGADO RECICLADO MISTO – ARM

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO / ISC / Expansão - ARC

Material:

Brita Graduada Reciclada de Concreto (ARC)

Data:

09/02/2017 a 13/02/2017

Local do Ensaio:

Laboratório da UTFPR

Normas:

NBR 6457/2016; NBR 15116/2004; NBR 7182/1986; NBR 9895/1987

Características da amostra

Granulometria		
Peneira	Massa (g)	Massa CP (g)
3/4"	980	545
4	4600	2560
Fundo	7000	3895
Total	12580	7000

Umidade após secagem					
Capsula	Peso Capsula (g)	Peso Úmido (g)	Peso Seco (g)	Umidade (%)	Média (%)
1	9,11	35,34	35,33	0,0	1,1
2	8,58	35,1	34,55	2,1	

Energia: Intermediária

Amostra	Água adicionada		Cilindro	Volume Cilindro (cm ³)	Peso do Cilindro (g)	Peso do cilindro + Amostra (g)	Peso Amostra (g)	Densidade e úmida (g/cm ³)	Capsula	Peso Capsula (g)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Umidade (%)	Umidade MÉDIA (%)	Peso seco (g/cm ³)
	ml	% (amostra)													
1	630	9,0%	9	2086,824	5204	9222	4018	1,925	5	8,83	30,53	28,47	10,5%	9,9%	1,752
2	770	11,0%	74	2080,443	5498	9680	4182	2,010	7	9,31	33,32	30,56	13,0%	12,5%	1,787
3	910	13,0%	11	2064,871	5414	9670	4256	2,061	8	8,35	35,64	32,73	11,9%	15,6%	1,783
4	1100	15,7%	50	2083,176	5158	9454	4296	2,062	9	10,34	35,31	32,13	14,6%	17,9%	1,750
5	1310	18,7%	10	2083,17	4930	9220	4290	2,059	10	9,55	32,66	29,36	16,7%	18,4%	1,739
									11	8,65	31,79	28,38	17,28%		
									12	10,13	35,48	31,53	18,46%		
									13	10,59	48,36	42,42	18,66%		
									14	10,35	41,68	36,85	18,23%		

Compactação

** A amostra foi seca em estufa previamente para os testes

** Os ensaios de compactação foram feitos com Energia Intermediária, conforme NBR 15115

Amostra	Cilindro	Expansão	
		Leitura inicial (mm)	Leitura Final (mm)
1	9	0,01	0,02
2	74	0,02	0,06
3	11	0,01	0,01
4	50	0,97	1
5	10	0,9	0,9

Amostra	Cilindro	CBR		
		Peso após imersão (g)	CBR1 (%)	CBR2 (%)
1	9	-	-	-
2	74	51,96	67,93	67,93
3	11	40,86	54,21	54,21
4	50	24,76	34,71	34,71
5	10	7,64	11,54	11,54

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO / ISC / Expansão - ARC - REPETIÇÃO DO PONTO ÓTIMO

Material: Brita Graduada Reciclada de Concreto (ARC)
 Data: 17/02/2017 a 21/02/2017
 Local do Ensaio: Laboratório da UTFPR
 Normas: NBR 6457/2016; NBR 15116/2004; NBR 15115/2004; NBR 7182/1986; NBR 9895/1987

Características da amostra

Granulometria		Umidade após secagem						
Peneira	Massa (g)	% Retido	Massa CP (g)	Peso Capsula (g)	Peso Úmido (g)	Peso Seco (g)	Umidade (%)	Média (%)
3/4"	980	7,8%	351	8,84	32,89	32,67	0,9	0,8
4	4600	36,6%	1645	8,86	37,93	37,71	0,8	
Fundo	7000	55,6%	2504					
Total	12580	100%	4500					

Compactação															
Amostra	Água adicionada		Cilindro	Volume Cilindro (cm ³)	Peso do Cilindro (g)	Peso do cilindro + Amostra (g)	Peso Amostra (g)	Densidade e úmida (g/cm ³)	Capsula	Peso Capsula (g)	Peso umido (g)	Peso seco (g)	Umidade (%)	Umidade MÉDIA (%)	Peso seco (g/cm ³)
	ml	% (amostra)													
3	910	13,0%	9	2086,824	5204	9440	4236	2,030	15	8,84	37,57	34,4	12,4%	12,9%	1,799
4	910	13,0%	74	2080,443	5498	9674	4176	2,007	9	10,34	37,28	34,26	12,6%	13,4%	1,771

** A amostra foi seca em estufa previamente para os testes

** Os ensaios de compactação foram feitos com Energia Intermediária, conforme NBR 15115

Amostra	Cilindro	Expansão			CBR					
		Leitura inicial (mm)	Leitura Final (mm)	Altura do CP (cm)	Expansão (%)	Peso após imersão (g)	Cilindro	CBR1	CBR2	CBR adot
3	9	3,800	3,850	11,44	0,04%	4378	9	46,28	71,15	71,15
4	74	9,750	9,790	11,42	0,04%	4306	74	71,05	95,05	95,05

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO / ISC / Expansão - ARM

Material: **Brita 4A Reciclada Mistra (ARM)**

Data: 29/05/2017

Local do Ensaio: **Laboratório SMOOP**

Normas: **NBR 6457/2016; NBR 15116/2004; NBR 15115/2004; NBR 7182/1986; NBR 9895/1987**

Utilização: **Sub-Base**

Características da amostra

Granulometria		
Peneira	Massa (g)	Massa CP (g)
3/4"	0	0
4	25900	4076
Fundo	18580	2924
Total	44480	7000

Umidade após secagem			
Capsula	Peso Capsula (g)	Peso Úmido (g)	Peso Seco (g)
1	18,5	78,5	78,5
2	28,4	89,2	89,1

Umidade (%)	
Umidade	Média
0,0	0,1
0,2	

Energia Intermediária: 26 golpes

Amostra	Água adicionada		Cilindro	Volume Cilindro (cm ³)	Peso do Cilindro (g)	Peso do cilindro + Amostra (g)	Peso Amostra (g)	Densidade de úmida (g/cm ³)	Capsula	Peso Capsula (g)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Umidade (%)	Umidade MÉDIA (%)	Peso seco (g/cm ³)
	ml	% (amostra)													
1	420	6,0%	6	2278	4795	9100	4305	1,890	53	18,1	111,8	105,9	6,7%	6,0%	1,783
2	630	9,0%	12	2273	4850	9340	4490	1,975	15	16,2	85,5	79,7	9,1%	9,3%	1,807
3	840	12,0%	18	2265	5490	10050	4560	2,013	6	20,4	104,7	95,5	12,3%	12,1%	1,796
4	1050	15,0%	22	2276	5500	10160	4660	2,047	13	19,20	94,20	86,2	11,9%	15,3%	1,775
5	1260	18,0%	5	2264	4920	9620	4700	2,076	10	18,7	122,2	108,4	15,4%	18,4%	1,753
									27	18,5	126,4	112,1	15,3%		
									21	24,6	182,6	157,9	18,5%		
									22	26,5	156,4	136,3	18,3%		

** A amostra foi seca em estufa previamente para os testes

** Os ensaios de compactação foram feitos com Energia Intermediária, conforme NBR 15115

Amostra	Expansão		
	Cilindro	Leitura inicial (mm)	Leitura Final (mm)
1	6	0	0,16
2	12	0	0,23
3	18	0	0,115
4	22	1	1,04
5	5	1	1,03

Amostra	Cilindro	Peso após imersão (g)	CBR			Absorção (%)	Umidade (%)
			CBR1 (%)	CBR2 (%)	CBR adot (%)		
1	6	4912	25,27	30,63	30,63	14,1%	6,0%
2	12	4890	87,31	84,24	87,31	8,9%	9,3%
3	18	4945	42,12	53,61	53,61	8,4%	12,1%
4	22	4955	8,42	19,91	19,91	6,3%	15,3%
5	5	4897	6,13	6,13	6,13	4,2%	18,4%

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO / ISC / Expansão - ARM - REPETIÇÃO DO PONTO ÓTIMO

Material: Brita Graduada Reciclada de Concreto (ARC)

Data: 23 a 27/06/2017

Local do Ensaio: Laboratório da SMOP

Normas: NBR 6457/2016; NBR 15116/2004; NBR 15115/2004; NBR 7182/1986; NBR 9895/1987

Características da amostra

Granulometria			
Peneira	Massa (g)	% Retido	Massa CP (g)
3/4"	980	0,0%	0
4	4600	58,2%	4074
Fundo	7000	41,8%	2926
Total	12580	100%	7000

Umidade após secagem			
Capsula	Peso Capsula (g)	Peso Úmido (g)	Peso Seco (g)
10	17,1	87,5	87,3
13	16,7	68,8	68,7
			Média (%)
			0,2

Energia Intermediária - 26 golpes

Compactação															
Amostra	Água adicionada		Cilindro	Volume Cilindro (cm ³)	Peso do Cilindro (g)	Peso do cilindro + Amostra (g)	Peso Amostra (g)	Densidade úmida (g/cm ³)	Capsula	Peso Capsula (g)	Peso úmido (g)				
	ml	% (amostra)										Peso seco (g)	Umidade (%)	Umidade MÉDIA (%)	Peso seco (g/cm ³)
1	665	9,5%	12	2273	4850	9340	4490	1,975	37	18,5	60,8	57,1	9,6%	9,4%	1,805
											52,2	49,3	9,3%		
2	665	9,5%	6	2278	4795	9300	4505	1,978	284	24,9	66,4	62,8	9,5%	9,5%	1,807
											74,1	69,9	9,4%		

** A amostra foi seca em estufa previamente para os testes

** Os ensaios de compactação foram feitos com Energia Intermediária, conforme NBR 15115

Expansão			
Amostra	Cilindro	Leitura inicial (mm)	Leitura Final (mm)
1	12	1	1,19
2	6	0	0,21
			Altura do CP (cm)
			12,51
			12,49
			Expansão (%)
			0,15%
			0,17%

CBR

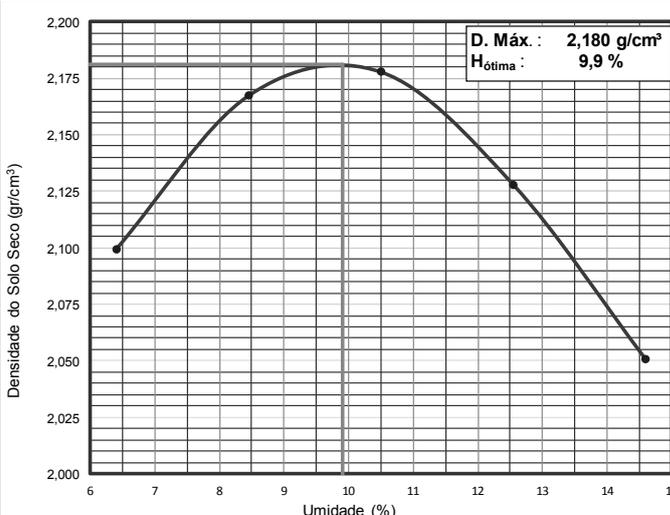
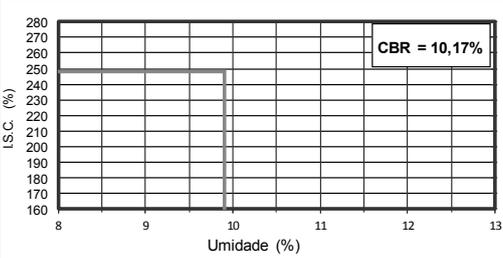
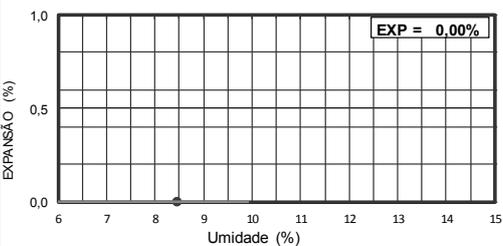
Amostra	Cilindro	Peso após imersão (g)	CBR1 (%)	CBR2 (%)	CBR adotado (%)	Absorção (%)	Umidade (%)
1	12	4870	52,08	56,67	56,67	8,5%	9,4%
2	6	4925	41,36	48,5	48,50	9,3%	9,5%

APÊNDICE 03 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE INDÍCE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC ou CBR) E EXPANSÃO PARA O EXPERIMENTO DE COMPOSTO CENTRAL

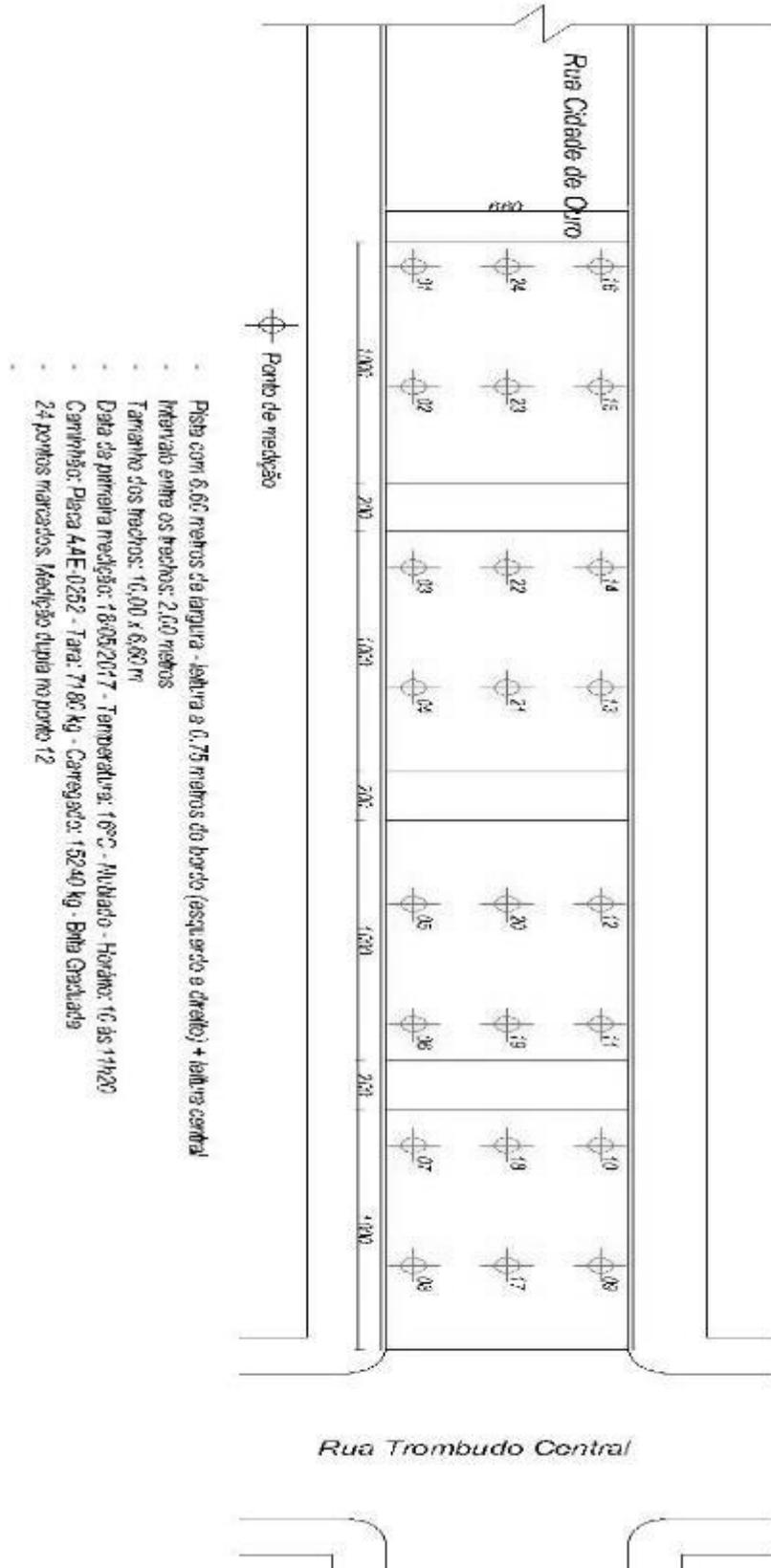
Amostra	Água adicionada		Cilindro	Volume Cilindro (cm ³)	Peso do Cilindro (g)	Peso do cilindro + Amostra (g)	Peso Amostra (g)	Densidade de úmida (g/cm ³)	Capsula	Peso Capsula (g)	Peso umido (g)	Peso seco (g)	Umidade (%)	Umidade MÉDIA (%)	Peso seco (g/cm ³)	Golpes	CBR (%)	Expansão (%)
	ml	% (amostra)																
1	560	8%	59	2266,4153	4000	8405	4405	1,944	38	18	85,70	80,8	7,8%	7,83%	1,803	13	0,08	18,02
2	1260	18,0%	57	2262,7861	3928	8783	4855	2,146	25	17,5	116,60	101,2	18,4%	18,23%	1,815	13	0,02	21,75
3	560	8,0%	36	2266,9254	5279	9935	4656	2,054	60	19,1	96,10	90,5	7,8%	8,03%	1,901	55	0,07	110,09
4	1260	18,0%	5	2264,0000	4920	9590	4670	2,063	4	26,1	140,0	123	17,5%	17,85%	1,750	55	0,05	13,27
5	910	13,0%	18	2271,0629	5476	10310	4834	2,129	10	17,6	90,1	81,7	13,1%	12,79%	1,887	34	0,06	99,56
6	420	6,0%	57	2241,0111	3928	8350	4422	1,973	60	19,0	107,0	102,2	5,8%	5,66%	1,867	34	0,14	53,77
7	1400	20,0%	18	2265,0000	5490	10190	4700	2,075	6	17,8	98,2	84,4	20,7%	20,5%	1,723	34	0,04	14,30
8	910	13,0%	9	2267,4146	4685	9480	4795	2,115	52	18,8	85,6	78,3	12,3%	12,63%	1,878	34	0,02	94,96
9	910	13,0%	12	2262,6182	4740	9600	4860	2,148	47	16,7	95,4	86,5	12,8%	13,34%	1,895	34	0,03	107,22
10	910	13,0%	18	2271,0629	5475	10560	5085	2,239	52	18,6	92,1	84,4	11,7%	11,50%	2,008	64	0,04	89,56
11	910	13,0%	9	2267,4146	4685	8860	4175	1,841	11	19,0	101,8	91,1	14,8%	13,51%	1,622	4	0,10	7,01

Observação: Os corpos de prova foram moldados em diferentes datas devido a limitação de cilindros para a execução dos ensaios

APÊNDICE 04 – INDICE CBR DO SUBLEITO DA RUA CIDADE DE OURO

	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO (Compactação, I.S.C e Expansão)											
Rua: Cidade de Ouro	Pl: 54	Nº Golpes:			Proctor:							
Distrito:	Lado: LD	Horizonte:										
Data: 09/07/2015	Estaca: 6+10	Material:			Operador: Verci							
COMPACTAÇÃO												
UMIDADE HIGROSCÓPICA			Nº Moldes	57	29	58	41	35	CILINDROS			
Cápsula Nº	1		Umidade Calculada (%)	6,4	8,5	10,5	12,5	14,6	Nº	Peso	Volume	
C + S + A (gr)	406,80		Água Adicionada (gr)	280,0	420,0	560,0	700,0	840,0	57	4.838,0	2.069,0	
C + S (gr)	397,60		% Água Adicionada	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	29	4.166,0	2.050,0	
A - Água (gr)	9,20		M + S + A (gr)	9.460,0	9.695,0	9.270,0	9.780,0	9.077,0	58	4.260,0	2.082,0	
C - Cápsula (gr)			S + A (gr)	4.622,0	5.529,0	5.010,0	4.926,0	4.911,0	41	4.854,0	2.057,0	
S - Solo (gr)	397,60		Dens. Úmida (gr/cm ³)	2,234	2,697	2,406	2,395	2,350	35	4.166,0	2.090,0	
Umidade - h (%)	2,31		Dens. Convert. (gr/cm ³)	-	-	-	-	-	Peso Mat.:	7.000,0		
Umidade Média (%)	2,31		Dens. Seca (gr/cm ³)	2,099	2,487	2,178	2,128	2,051	Peso Seco:	6.841,7		
Cálculo do I.S.C.												
Cálculo do I.S.C.	Penetração (mm)			0,63	1,27	1,90	2,54	3,81	5,08	7,62	10,16	12,70
	Tempo (m)			0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0
	Cilindro Nº	Leitura do Anel										
		Pressão kgf/cm ²	Padrão									
			Corrigida									
	I.S.C. (%)											
	Cilindro Nº	Leitura do Anel		46	56	63	68	72	79			
		Pressão kgf/cm ²	Padrão				70		103,5			
			Corrigida	5,01	6,10	6,87	7,41	7,85	8,61			
		I.S.C. (%)					10,17		8,3			
EXPANSÃO												
EXPANSÃO	Data	Hora	Nº. Cilindro	Altura Inicial (mm)	Leituras (mm)				Diferença (mm)	Expansão (%)	Massa do Cilindro c/ Solo Final	Diferença (mm)
					1º Dia	2º Dia	3º Dia	4º Dia				
	00/01/1900	14:00	06	116,00	2,00			2,00	0,00	0,00		
GRÁFICOS												
 <p>D. Máx. : 2,180 g/cm³ H_{ótima} : 9,9 %</p>						 <p>CBR = 10,17%</p>						
						 <p>EXP = 0,00%</p>						

**APÊNDICE 05 – LEITURAS DA VIGA BENKELMAN
- CROQUI DE LOCALIZAÇÃO DA LEITURA DOS PONTOS**



- MEDIÇÃO ANTES DA EXECUÇÃO DOS TRECHOS – M01

Medições Deflectométricas	
Local: R. Cidade de Ouro	Trecho: R. José Augusto da Silva e R. Trombudo Central
Data: 18/05/2017 - Período da manhã	
Temperatura 16°C	
Caminhão utilizado: Caminhão Basculante placa AAE 0252, tara 7,180 ton, carregamento total 15,24 ton	
Tipo de pavimento: TSB	
a/b 2,014	Tipo de Tráfego (N): 500000

Trecho	Ponto	Localização	Medições antes da construção do trecho											
			Lo	Lfinal	do (0,01 mm)	Média	Desvio Padrão	Z	Intervalo	Fs	Dc	Dp	Dadm (0,01 mm)	Conclusão
1	1	Esquerdo	500	410	181,3	253,1	78,8	2,0	95,4 410,8	1,1	331,9	365,1	101,6	Dp > 3Dadm
1	2	Esquerdo	500	425	151,1									
1	15	Direito	500	315	372,6									
1	16	Direito	500	360	282,0									
1	23	Centro	500	365	271,9									
1	24	Centro	500	371	259,8									
2	3	Esquerdo	500	345	312,2	262,2	44,7	2,0	172,8 351,5	1,1	306,8	337,5	101,6	Dp > 3Dadm
2	4	Esquerdo	500	384	233,6									
2	13	Direito	500	365	271,9									
2	14	Direito	500	343	316,2									
2	21	Centro	500	390	221,5									
2	22	Centro	500	392	217,5									
3	5	Esquerdo	500	361	279,9	289,3	57,7	2,0	173,9 404,8	1,1	347,1	381,8	101,6	Dp > 3Dadm
3	6	Esquerdo	500	380	241,7									
3	11	Direito	500	350	302,1									
3	12	Direito	500	302	398,8									
3	19	Centro	500	375	251,8									
3	20	Centro	500	370	261,8									

- MEDIÇÃO LOGO APÓS EXECUÇÃO DOS TRECHOS – M02

Medições Deflectométricas														
Local: R. Cidade de Ouro Trecho: R. José Augusto da Silva e R. Trombudo Central														
Data: 18/08/2017 - Período da manhã														
Temperatura 15°C														
Caminhão utilizado: Caminhão Basculante placa AAE 0252, tara 7,180 ton, carregamento total 15,24 ton														
Tipo de pavimento: TSB														
a/b	2,014				Tipo de Tráfego (N): 500000									

Trecho	Ponto	Localização	Medições APÓS da construção do trecho												Conclusão
			Lo	Lfinal	do (0,01 mm)	Média	Desvio Padrão	Z	Intervalo	Fs	Dc	Dp	Dadm (0,01 mm)		
1	1	Esquerdo	500	425	151,1	126,2	33,1	2,0	59,9	1,1	159,3	175,3	101,6	3DAdm ≥ DP > Dadm	
1	2	Esquerdo	500	430	141,0										
1	15	Direito	500	425	151,1										
1	16	Direito	500	431	139,0										
1	23	Centro	500	467	66,5										
1	24	Centro	500	446	108,8										
2	3	Esquerdo	500	433	134,9	112,4	24,5	2,0	63,4	1,1	137,0	150,7	101,6	3DAdm ≥ DP > Dadm	
2	4	Esquerdo	500	444	112,8										
2	13	Direito	500	441	118,8										
2	14	Direito	500	435	130,9										
2	21	Centro	500	445	110,8										
2	22	Centro	500	467	66,5										

- MEDIÇÃO 2 MESES APÓS EXECUÇÃO DOS TRECHOS – M03

Medições Deflectométricas														
Local: R. Cidade de Ouro Trecho: R. José Augusto da Silva e R. Trombudo Central														
Data: 16/09/2017 - Período da manhã														
Temperatura 18°C														
Caminhão utilizado: Caminhão Basculante placa AAE 0252, tara 7,180 ton, carregamento total 15,24 ton														
Tipo de pavimento: TSB														
a/b	2,014				Tipo de Tráfego (N): 500000									

Trecho	Ponto	Localização	Medições APÓS da construção do trecho												Conclusão
			Lo	Lfinal	do (0,01 mm)	Média	Desvio Padrão	Z	Intervalo	Fs	Dc	Dp	Dadm (0,01 mm)		
1	1	Esquerdo	500	493	14,1	20,1	12,3	2,0	-4,6	1,1	32,5	35,7	101,6	DAdm ≥ DP	
1	2	Esquerdo	500	490	20,1										
1	15	Direito	500	491	18,1										
1	16	Direito	500	493	14,1										
1	23	Centro	500	495	10,1										
1	24	Centro	500	478	44,3										
2	3	Esquerdo	500	485	30,2	22,2	9,4	2,0	3,3	1,1	31,6	34,8	101,6	DAdm ≥ DP	
2	4	Esquerdo	500	490	20,1										
2	13	Direito	500	495	10,1										
2	14	Direito	500	485	30,2										
2	21	Centro	500	485	30,2										
2	22	Centro	500	494	12,1										

APÊNDICE 06 – COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS

ORÇAMENTO BÁSICO - TRECHO COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO			
LOCALIZAÇÃO		DADOS DO TRECHO	
Endereço: Cidade de Ouro		Extensão do trecho (m)	10
Transversais:	Rua Trombudo Central	Largura do trecho (m)	6,6
	Rua Mario Chimelli	Espessura da sub-base (cm)	15
Bairro: Sítio Cercado	Quadrícula: V-13	Espessura da base (cm)	15
Observações:		Área de imprimação (m ²)	66
		Espessura da camada de CBUQ (cm)	6
		Emulsão	RM-1C

Item	Descrição	Ud.	Qtidade	Unitário	Total
1.	Equipamentos	Total			R\$ 843,05
1.1	Retroescavadeira	h	6,0	R\$ 34,09	R\$ 204,52
1.2	Caminhão Basculante (Agregados) - 12 m ³	h	8,0	R\$ 35,73	R\$ 285,83
1.2	Caminhão Basculante (CBUQ) - 12 m ³	h	4,0	R\$ 35,73	R\$ 142,91
1.3	Rolo Compactador Liso	h	6,0	R\$ 18,69	R\$ 112,16
1.4	Caminhão Espargidor	h	2,0	R\$ 30,12	R\$ 60,25
1.5	Rolo Compactador Pneu	h	2,0	R\$ 18,69	R\$ 37,39
					R\$ -
2.	Mão de Obra	Total			R\$ 1.384,07
2.1	Encarregador	h	8,0	R\$ 21,93	R\$ 175,48
2.2	Servente	h	48,0	R\$ 15,83	R\$ 759,83
2.3	Motorista Caminhão Basculante	h	12,0	R\$ 19,87	R\$ 238,42
2.4	Motorista Caminhão Espargidor	h	2,0	R\$ 17,06	R\$ 34,12
2.5	Operador de rolo compactador	h	8,0	R\$ 17,06	R\$ 136,48
2.6	Operador de Caminhão Espargidor	h	2,0	R\$ 19,87	R\$ 39,74
3.	Materiais	Total			R\$ 3.772,50
3.1	Brita Graduada Reciclada de concreto	ton	35,7	R\$ 34,58	R\$ 1.235,85
3.2	Emulsão RM-1C	ton	0,10	R\$ 2.426,44	R\$ 240,22
3.3	CBUQ - Faixa C	ton	9,8	R\$ 234,78	R\$ 2.296,43
					R\$ -

Total	R\$ 5.999,61
--------------	---------------------

Custo por Km (7 metros de largura)	R\$ 636.322,76
---	-----------------------

ORÇAMENTO BÁSICO - TRECHO COM AGREGADO NATURAL			
LOCALIZAÇÃO		DADOS DO TRECHO	
Endereço: Cidade de Ouro		Extensão do trecho (m)	10
Transversais:	Rua Trombudo Central	Largura do trecho (m)	6,6
	Rua Mario Chimelli	Espessura da sub-base (cm)	15
Bairro: Sitio Cercado	Quadrícula: V-13	Espessura da base (cm)	15
Observações:		Área de imprimação (m ²)	66
		Espessura da camada de CBUQ (cm)	6
		Emulsão	RM-1C

Item	Descrição	Unidade	Qtde	Unitário	Total
1.	Equipamentos	Total			R\$ 843,05
1.1	Retroescavadeira	h	6,0	R\$ 34,09	R\$ 204,52
1.2	Caminhão Basculante (Agregados) - 12 m ³	h	8,0	R\$ 35,73	R\$ 285,83
1.2	Caminhão Basculante (CBUQ) - 12 m ³	h	4,0	R\$ 35,73	R\$ 142,91
1.3	Rolo Compactador Liso	h	6,0	R\$ 18,69	R\$ 112,16
1.4	Caminhão Espargidor	h	2,0	R\$ 30,12	R\$ 60,25
1.5	Rolo Compactador Pneu	h	2,0	R\$ 18,69	R\$ 37,39
					R\$ -
2.	Mão de Obra	Total			R\$ 1.384,07
2.1	Encarregador	h	8,0	R\$ 21,93	R\$ 175,48
2.2	Servente	h	48,0	R\$ 15,83	R\$ 759,83
2.3	Motorista Caminhão Basculante	h	12,0	R\$ 19,87	R\$ 238,42
2.4	Motorista Caminhão Espargidor	h	2,0	R\$ 17,06	R\$ 34,12
2.5	Operador de rolo compactador	h	8,0	R\$ 17,06	R\$ 136,48
2.6	Operador de Caminhão Espargidor	h	2,0	R\$ 19,87	R\$ 39,74
3.	Materiais	Total			R\$ 4.685,46
3.1	Brita 4A	ton	21,8	R\$ 52,33	R\$ 1.139,75
3.2	Brita Graduada	ton	21,78	R\$ 46,33	R\$ 1.009,07
3.3	Emulsão RM-1C	ton	0,1	R\$ 2.426,44	R\$ 240,22
3.4	CBUQ - Faixa C	ton	9,8	R\$ 234,78	R\$ 2.296,43

Total	R\$ 6.912,57
--------------	---------------------

Custo por Km (7 metros de largura)	R\$ 733.151,87
---	-----------------------