

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELAINE SOUZA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS BRITADORES DE MANDÍBULA E DE
IMPACTO NAS PROPRIEDADES DE AGREGADOS RECICLADOS PARA
APLICAÇÃO EM BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS**

CURITIBA

2016

ELAINE SOUZA DOS SANTOS

AValiação da Influência dos Britadores de Mandíbula e de Impacto nas Propriedades de Agregados Reciclados para Aplicação em Bases e Sub-bases de Pavimentos

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, Área de concentração em Materiais e Estruturas, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

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

CURITIBA

2016

Santos, Elaine Souza dos

Avaliação da influência dos britadores de mandíbula e de impacto nas propriedades de agregados reciclados para aplicação em bases e sub-bases de pavimentos / Elaine Souza dos Santos. – Curitiba, 2016. 130 f. : il.; tabs., graf.

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

Orientador: Leonardo F. R. Miranda

Bibliografia: p. 101-109

1. Britadores. 2. Pavimentos. 3. Indústria de construção civil – Resíduos sólidos. I. Miranda, Leonardo F. R. II. Título.

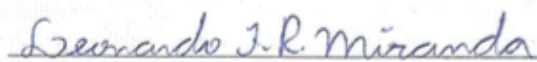
CDD 622.3382

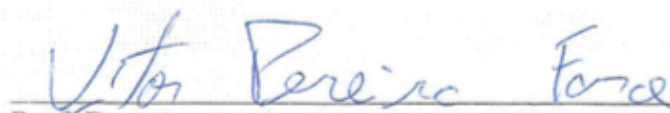
TERMO DE APROVAÇÃO

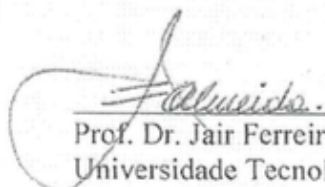
ELAINE SOUZA DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS BRITADORES DE MANDÍBULA E DE IMPACTO NAS PROPRIEDADES DE AGREGADOS RECICLADOS PARA APLICAÇÃO EM BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela banca examinadora formada pelos professores:


Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosemback Miranda (Orientador)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.


Prof. Dr. Vitor Pereira Faro
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.


Prof. Dr. Jair Ferreira de Almeida
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

Curitiba, 01 de junho de 2016

AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento não poderia ser dedicado a mais ninguém, senão a Deus.

Ao meu orientador, professor Dr. Leonardo F. R. Miranda, pela orientação, ensinamentos e acompanhamento durante a pesquisa.

À usina URBEM pelo fornecimento de RCD e britagem no britador de impacto e à usina PROGUARU pela britagem no britador de mandíbula. Pelo apoio financeiro ao BNDES.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de conhecimento recebida, juntamente com o suporte dos técnicos de laboratório Douglas Mancini e Ricardo Volert nas estruturas do LAME (Laboratório de Materiais e Estruturas da UFPR).

Ao meu marido que esteve presente em todos os momentos e ao meu lado, sendo apoio e companheiro de profissão nas atividades realizadas.

À minha família, como forma de gratidão a tudo que já recebi dela.

Aos amigos, pela compreensão em momentos de ausência e incentivo na conquista do título de mestre.

SANTOS, E. S. Avaliação da influência dos britadores de mandíbula e de impacto nas propriedades de agregados reciclados para aplicação em bases e sub-bases de pavimentos. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

RESUMO

A reciclagem do resíduo de construção e demolição (RCD) tem crescido nos últimos anos. O agregado reciclado pode ser aplicado em diversas finalidades, tais como bases e sub-bases de pavimentos, argamassas e fabricação de pré-moldados. Por sua vez, a reciclagem de RCD possui justificativa ambiental, uma vez que colabora para diminuição do uso de agregados naturais que se configuram como recursos não renováveis, bem como justificativa econômica, devido ao seu menor preço. Em discussões técnicas, a eficácia do material reciclado é motivo de questionamento, uma vez que sua qualidade para algumas aplicações ainda não foi completamente comprovada. Tendo em vista esses aspectos mencionados, torna-se imprescindível a implantação de normas técnicas orientadas ao agregado oriundo da reciclagem de resíduos da construção, além de estudos relacionados à influência dos equipamentos utilizados na produção na qualidade do agregado produzido. No Brasil, existem centenas de usinas de reciclagem de RCD, onde os britadores de mandíbula e de impacto são os mais empregados. Todavia, há pouco conhecimento sobre como tais equipamentos influenciam nas propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados. Apesar de ser afirmado que o britador de impacto produz agregados reciclados de melhor qualidade, isto não é consenso no meio técnico. Assim, o objetivo desta pesquisa é avaliar a influência do tipo de britador nas propriedades dos agregados a serem utilizados em base e sub-base de pavimentos. Para o programa experimental dessa pesquisa obtiveram-se quatro amostras de RCD que foram processadas no britador de mandíbulas (usina Proguaru, em Guarulhos/SP) e no de impacto (Urbem Tecnologia Ambiental, em São Bernardo do Campo/SP), sendo duas de origem em resíduo de concreto e duas de origem mista. Foram realizados os seguintes ensaios nas oito amostras: granulometria, índice de forma, massa unitária e específica, teor de finos < 75 μm , absorção de água, teor de argamassa aderida, microscopia eletrônica de varredura (MEV), abrasão Los Angeles, índice de suporte Califórnia (ICS ou CBR). Os ensaios de massa específica, absorção de água, microscopia eletrônica de varredura (MEV) não apresentaram diferenças significativas entre britadores. Já na análise granulométrica, as curvas mais finas foram encontradas nas amostras do britador de impacto assim como os maiores valores de massa unitária e teor de finos < 75 μm . O britador de mandíbula foi o que menos retirou argamassa aderida aos grãos. Quanto às propriedades relacionadas ao uso em base e sub-base de pavimentos não foi encontrada influência significativa dos britadores em relação aos agregados. O índice de forma que era uma propriedade a se esperar diferenças entre os britadores apresentou resultados que contradizem essa afirmação.

Palavras-chaves: agregado reciclado, britador de mandíbula, britador de impacto, base e sub-base de pavimento, reciclagem, resíduo de construção e demolição.

SANTOS, E. S. Evaluation of influence on recycled aggregates properties produced by jaw crusher and impact for use in base and subbases of paving. Master's dissertation, Civil Engineering, Federal University of Paraná, Curitiba, 2016.

ABSTRACT

The recycling of construction and demolition waste (CDW) has grown in the last years. The recycled aggregate can be applied to various purposes, such as base and subbase of pavements, mortars and precast manufacturing. On the other hand, the recycling of CDW has environmental justification, once it reduces the use of natural aggregates which are non-renewable resources, as well as economic justification, due to its lower price. In technical discussions, the efficacy of recycled material is questioned, once its quality for some applications remains incompletely proven. Considering these mentioned aspects, it becomes indispensable the implantation of technical standards oriented to the aggregate originated from recycling of construction waste, besides of studies related to the influence of the equipments utilized on production on quality of the produced aggregate. In Brazil, there are hundred of recycling plants of CDW, where the jaw crushers and impact crushers are the most employed. However, there is little knowledge about how such equipments influence the physical and mechanical properties of the recycled aggregate. Despite of the affirmation that the impact crushers produce recycled aggregates best quality, this is not a consensus. Therefore, the objective of this research is to evaluate the influence of the type of the crusher on properties of the aggregates to be utilized in base and subbase of pavements. The experimental program of this research obtained four samples of CDW which were processed in jaw crusher (Proguaru Plant, Guarulhos/SP) and in impact crusher (Urbem Environmental Technology, São Bernardo do Campo/SP), two of them originated from concrete waste and two originated from mixed waste. The following essays were performed on eight samples: grain size distribution, shape index, bulk density and specific mass, material finer than 75 μm , water absorption, bonded mortar index, scanning electron microscopy (SEM), Los Angeles abrasion, California bearing ratio (CBR). The essays of specific mass, water absorption, SEM did not revealed significative difference between the crushers. In the grain size distribution, the thinner curves were found on the samples from impact crushers as well as bigger values of bulk density and material finer than 75 μm . The jaw crusher was the one which removed less bonded mortar to the grains. Regarding to the properties related to the use in base and subbase pavements, it was not found significative influence of the crushers in relation to the aggregates. The shape index which were a property to be expected differences between the crushers presented results that contradicts this statement.

Keywords: recycled aggregate, jaw crusher, impact crusher, base and subbase of paving, recycling, construction and demolition waste.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - QUANTIDADE DE RCD COLETADOS NO BRASIL E SUAS REGIÕES	15
FIGURA 2 - ESTATÍSTICA DE TIPO DE BRITADOR POR USINA NO BRASIL	17
FIGURA 3 - CIRCUITOS TÍPICOS DA INDÚSTRIA RECICLADORA EMERGENTE EM PAÍSES COMO BRASIL E CHINA PARA PRODUÇÃO DE BRITA E RACHÃO	22
FIGURA 4 - CIRCUITO TÍPICO DA INDÚSTRIA RECICLADORA EXISTENTE NA ALEMANHA E HOLANDA PARA OBTENÇÃO DE BRITA DE CONCRETO.....	23
FIGURA 5 - PARTÍCULAS DE ACORDO COM O TIPO DE MECANISMO DE FRAGMENTAÇÃO	25
FIGURA 6 - CORTE ESQUEMÁTICO DO BRITADOR DE MANDÍBULAS	27
FIGURA 7 - CORTE ESQUEMÁTICO DO BRITADOR DE IMPACTO.....	29
FIGURA 8 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	47
FIGURA 9 - USINA DE RECICLAGEM URBEM	48
FIGURA 10 - USINA DE RECICLAGEM PROGRARU.....	49
FIGURA 11 - CORREIA TRANSPORTADORA	50
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA INICIAL DAS AMOSTRAS	51
FIGURA 13 - PILHAS DE HOMOGENEIZAÇÃO	52
FIGURA 14 - RETIRADA DA AMOSTRA: (A) DELIMITAÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA. (B) AMOSTRA COLETADA	52
FIGURA 15 - GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS.....	53
FIGURA 16 - RACHÃO, BRITA E PEDRISCO DE MATERIAL CONCRETO E MISTO DO BRITADOR DE IMPACTO.....	53
FIGURA 17 - REDUTOR DE AMOSTRAS TIPO JONES	55
FIGURA 18 - CONJUNTO DE SECAGEM.....	57
FIGURA 19 - SATURAÇÃO A VÁCUO.....	58
FIGURA 20 - GRÁFICO-BASE PARA DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO NO ORIGIN	59
FIGURA 21 - ENSAIO DE TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA: (A) AQUECIMENTO NO FORNO MUFLA. (B) IMERSÃO EM ÁGUA, APÓS AQUECIMENTO. (C) DESINTEGRAÇÃO AGREGADO/ARGAMASSA	60

FIGURA 22 - SEGUNDA ETAPA DO ENSAIO DE TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA: IMERSÃO DO AGREGADO EM ÁCIDO.....	61
FIGURA 23 - AMOSTRAS PARA MEV	62
FIGURA 24 - EQUIPAMENTO DE MEV	62
FIGURA 25 - EQUIPAMENTO DE ABRASÃO LOS ANGELES	65
FIGURA 26 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA FAIXA A - DNIT 141/2010	66
FIGURA 27 - ENSAIO DE ISC: (A) VIBRAÇÃO DA AMOSTRA. (B) IMERSÃO EM ÁGUA. (C) ETAPA DE PENETRAÇÃO.....	67
FIGURA 28 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS	70
FIGURA 29 - QUANTIDADE DE MATERIAL < 4,8 mm PRODUZIDA EM CADA BRITADOR.....	71
FIGURA 30 - COEFICIENTE DE CURVATURA	72
FIGURA 31- COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE	73
FIGURA 32 - MÓDULO DE FINURA.....	74
FIGURA 33 - IMAGEM DE MEV NA ESCALA 2 mm DA AMOSTRA IMA.....	74
FIGURA 34 - ARREDONDAMENTO DO AGREGADO MIÚDO	75
FIGURA 35 - ESFERICIDADE DO AGREGADO MIÚDO	76
FIGURA 36 - ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO.....	77
FIGURA 37 - ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS GRAÚDOS	77
FIGURA 38 - MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA DE ABERTURA 75 μ m	78
FIGURA 39 - MASSA UNITÁRIA DA AMOSTRA COMPLETA	79
FIGURA 40 - RELAÇÃO ABSORÇÃO DE ÁGUA X MASSA ESPECÍFICA APARENTE: FRAÇÃO AREIA.....	80
FIGURA 41 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA AMOSTRA IMA NO PROGRAMA ORIGIN: MÉTODO MICRO-ONDAS	81
FIGURA 42 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA AMOSTRA MMA NO PROGRAMA ORIGIN: MÉTODO MICRO-ONDAS	82
FIGURA 43 - ABSORÇÃO DE ÁGUA NBR NM 30 SEM FINOS < 75 μ m	83
FIGURA 44 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA FRAÇÃO PEDRISCO	83
FIGURA 45 - ABSORÇÃO DE ÁGUA NA FRAÇÃO BRITA.....	84
FIGURA 46 - ABSORÇÃO DE ÁGUA NA FRAÇÃO RACHÃO.....	85

FIGURA 47 - CORRELAÇÃO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA COM MASSA ESPECÍFICA APARENTE POR FRAÇÃO.....	86
FIGURA 48 - PERDA DE ARGAMASSA ADERIDA NO PEDRISCO MMA: (A) AGREGADO INICIAL. (B) AGREGADO APÓS IMERSÃO NA ÁGUA. (C) AGREGADO APÓS BANHO QUÍMICO	87
FIGURA 49 - PERDA DE ARGAMASSA ADERIDA NA BRITA MMA: (A) AGREGADO INICIAL. (B) AGREGADO APÓS IMERSÃO NA ÁGUA. (C) AGREGADO APÓS BANHO QUÍMICO.....	87
FIGURA 50 - PERDA DE ARGAMASSA ADERIDA NO RACHÃO MMA: (A) AGREGADO INICIAL. (B) AGREGADO APÓS IMERSÃO NA ÁGUA. (C) AGREGADO APÓS BANHO QUÍMICO.....	87
FIGURA 51 - TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA NA FRAÇÃO PEDRISCO.....	88
FIGURA 52 - TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA NA FRAÇÃO BRITA	89
FIGURA 53 - TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA NA FRAÇÃO RACHÃO	89
FIGURA 54 - RESULTADO DE ABRASÃO LOS ANGELES PARA AGREGADOS RECICLADOS	91
FIGURA 55 - RELAÇÃO ABRASÃO LOS ANGELES X ABSORÇÃO DE ÁGUA NA FRAÇÃO BRITA	92
FIGURA 56 - RELAÇÃO ABRASÃO LOS ANGELES X TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA NA FRAÇÃO BRITA	93
FIGURA 57 - CURVA GRANULOMÉTRICA MÉDIA FAIXA A – DNIT	94
FIGURA 58 - MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA X TEOR DE UMIDADE	94
FIGURA 59 - RESULTADOS DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA	95
FIGURA 60 - CORRELAÇÃO ISC X ABRASÃO LOS ANGELES	96
FIGURA 61 - CORRELAÇÃO ISC X ABSORÇÃO DE ÁGUA	97

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TEOR DE ABSORÇÃO PARA FRAÇÃO GRAÚDA DE AGREGADOS RECICLADOS	35
TABELA 2 - PROPRIEDADES ESTABELECIDAS PELA NBR 15116 PARA USO DO AGREGADO RECICLADO EM BASE E SUB-BASE	38
TABELA 3 - VALORES DE ISC PARA DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS RECICLADOS	41
TABELA 4 - VALORES DE COMPACTAÇÃO PARA DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS RECICLADOS.....	45
TABELA 5 - SUBDIVISÃO DE AMOSTRAS (PROGUARU)	49
TABELA 6 - SUBDIVISÃO DE AMOSTRAS DA PESQUISA	54
TABELA 7 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	56
TABELA 8 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS PARA USO EM BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS.....	64
TABELA 9 - FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DNIT 141/2010.....	66
TABELA 10 - RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO NA AMOSTRA COMPLETA E NA FRAÇÃO GRAÚDA DOS AGREGADOS RECICLADOS	69
TABELA 11 - RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO NA FRAÇÃO AREIA DOS AGREGADOS RECICLADOS.....	69
TABELA 12 - RESULTADOS GERAIS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS PARA USO EM BASE E SUB-BASE	90

LISTA DE SIGLAS

ARC - Agregado de resíduo de concreto

ARM - Agregado de resíduo misto

CBR - *California Bearing Ratio*

CC - Coeficiente de curvatura

CDW - *Construction and demolition waste*

Cu - Coeficiente de uniformidade

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

ICA - Impacto concreto lote A

ICB - Impacto concreto lote B

IMA - Impacto misto lote A

IMB - Impacto misto lote B

ISC - Índice de Suporte Califórnia

MCA - Mandíbula concreto lote A

MCB - Mandíbula concreto lote B

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

MMA - Mandíbula misto lote A

MMB - Mandíbula misto lote B

PROGUARU - Proguaru S/A Progresso e Desenvolvimento de Guarulhos

RCD - Resíduo de construção e demolição

URBEM - Usina de reciclagem e beneficiamento de entulho e materiais de construção

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	14
1.2 OBJETIVO	18
1.3 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA	18
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	19
2.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	20
2.2 PROCESSO DE RECICLAGEM.....	22
2.3 BRITADORES	24
2.3.1. Britador de mandíbula.....	26
2.3.2. Britador de impacto.....	28
2.4 CARACTERISTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS	30
2.4.1. Granulometria	30
2.4.2. Índice de forma	32
2.4.3. Teor de finos < 75 µm.....	33
2.4.4. Massa unitária e massa específica.....	33
2.4.5. Absorção de água e teor de argamassa aderida.....	34
2.5 USO DE AGREGADO RECICLADO EM BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO	37
2.5.1. Abrasão Los Angeles	38
2.5.2. Índice de Suporte Califórnia e expansibilidade	40
2.5.3. Índice de degradação após compactação Proctor.....	41
2.5.4. Resiliência	42
2.5.5. Compactação	43
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	46
3.1 AMOSTRAGEM.....	48
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	55
3.2.1. Ensaio de absorção dos agregados miúdos	56
3.2.2. Ensaio de determinação de teor de argamassa aderida	59
3.2.3. Microscopia eletrônica de varredura.....	61
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS PARA USO EM BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS	63

3.3.1. Abrasão Los Angeles	64
3.3.2. Índice de Suporte Califórnia	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
4.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS.....	68
4.1.1. Curvas granulométricas	70
4.1.2. Formas dos grãos	74
4.1.3. Material passante na peneira de abertura 75 μm	78
4.1.4. Massas unitárias e massas específicas das amostras.....	79
4.1.5. Absorção de água das amostras	80
4.1.6. Teor de argamassa aderida das amostras	86
4.2 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADO PARA USO EM BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS.....	90
4.2.1. Abrasão Los Angeles das amostras.....	91
4.2.2. Índice de Suporte Califórnia das amostras.....	93
5. CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS.....	101
APÊNDICE A - FORMA DOS GRÃOS NA FRAÇÃO MIÚDA.....	110
APÊNDICE B - ARREDONDAMENTO, ESFERICIDADE E ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO MIÚDO.....	111
APÊNDICE C - ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO GRAÚDO.....	114
APÊNDICE D - TEOR DE MATERIAL < 75 μm.....	115
APÊNDICE E - MASSA UNITÁRIA DA AMOSTRA COMPLETA.....	117
APÊNDICE F - MASSA ESPECÍFICA DE TODAS AS FRAÇÕES.....	119
APÊNDICE G - ABSORÇÃO DE ÁGUA COM MATERIAL < 75 μm E MÉTODO DO MICRO-ONDAS	120
APÊNDICE H - ABSORÇÃO DE ÁGUA SEM MATERIAL < 75 μm.....	121
APÊNDICE I - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA FRAÇÃO PEDRISCO.....	123
APÊNDICE J - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA FRAÇÃO BRITA.....	125
APÊNDICE K - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA FRAÇÃO RACHÃO	127
APÊNDICE L - TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA	129

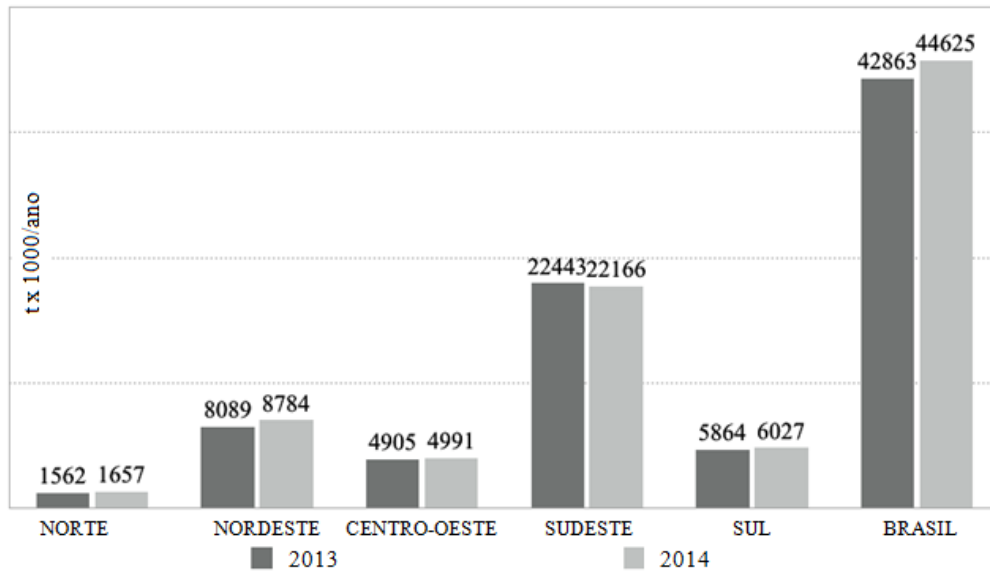
1. INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A tecnologia de reciclagem de resíduo de construção e demolição (RCD) surgiu em 1946, após a Segunda Guerra Mundial, impulsionada pela necessidade de reconstrução das cidades destruídas. Nesta ocasião, o material resultante da demolição dos edifícios foi britado e posteriormente utilizado na confecção de concreto (TRISTANTE et al., 2009). Desde então, a reciclagem de resíduos da construção civil tem apresentado diversas aplicações, além de vantagens relacionadas às esferas ambiental, tecnológica e econômica. Dentre as vantagens, constam a reciclagem dos materiais, reduzindo o uso de recursos não renováveis, a redução da disposição inadequada, o beneficiamento dos produtos, a redução dos custos com transporte e não aproveitamento, além de economia na substituição da compra de matéria-prima natural.

É de amplo conhecimento que a construção civil é o setor responsável pela predominância da massa total dos resíduos sólidos urbanos (SINDUSCON-SP, 2005). Não menos importante, o setor também se destaca pela magnitude dos impactos ambientais gerados (PINTO, 2005). Dados da ABRELPE (2014) mostram a situação da coleta de RCD nas regiões do Brasil nos anos de 2013 e 2014. A diferença em quantidade (t x 1000/ano) de um ano para outro foi de 4,1%, como pode ser visto na FIGURA 1. Esse aumento representa um grave problema em muitas cidades brasileiras, uma vez que a disposição irregular destes resíduos pode gerar problemas de ordem estética, ambiental e de saúde pública. Igualmente, o problema influi sobre os sistemas de limpeza pública municipal. A partir da avaliação dos dados, não se permite concluir que esses números tendam a diminuir ao longo de um período de tempo em que se trabalhe na redução de geração de resíduos. Sendo assim, uma alternativa como a reciclagem eficiente desses resíduos é algo a ser pensado, em especial na redução do montante de resíduos gerados através da reciclagem e reaplicação do material no próprio ambiente da construção civil.

FIGURA 1 - QUANTIDADE DE RCD COLETADOS NO BRASIL E SUAS REGIÕES



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2014).

A implantação de uma usina de reciclagem de RCD esbarra em alguns entraves, em especial no tocante ao local onde a usina será inserida. Entre os principais aspectos que devem ser levados em conta, destacam-se a geração de ruídos, potencial poeira e a invasão de caminhões em locais indesejáveis (HANSEN, 2005).

Outro fator a ser discutido diz respeito à qualidade do material reciclado, uma vez que ainda existem, no meio técnico, dúvidas quanto a sua eficácia. Sendo assim, fazem-se necessários a implantação de normas técnicas exclusivas a esse tipo de agregado e estudos sobre os equipamentos utilizados na produção.

No Brasil as usinas possuem tecnologia relativamente simples. Há pouco controle da qualidade sistemática do produto resultante. Esse descaso resulta em agregados com composições variáveis e elevados teores de materiais cerâmicos e de argamassa (ANGULO et al., 2002) que geram dúvidas a respeito da aplicabilidade dos agregados reciclados.

Para a definição dos equipamentos de britagem, é importante levar em consideração suas características, que estão reacionadas ao sistema produtivo e às condições do mercado local. As aplicações mais favoráveis são aquelas que melhor aproveitam as características físico-químicas do resíduo, conduzindo a um novo produto com maior desempenho e menor impacto ambiental que as soluções tradicionais. Dessa forma, aumenta-se a competitividade em um nicho específico

de mercado (JOHN e ANGULO, 2003), aumentando também as vantagens da reciclagem e do uso dos RCD no setor da construção civil.

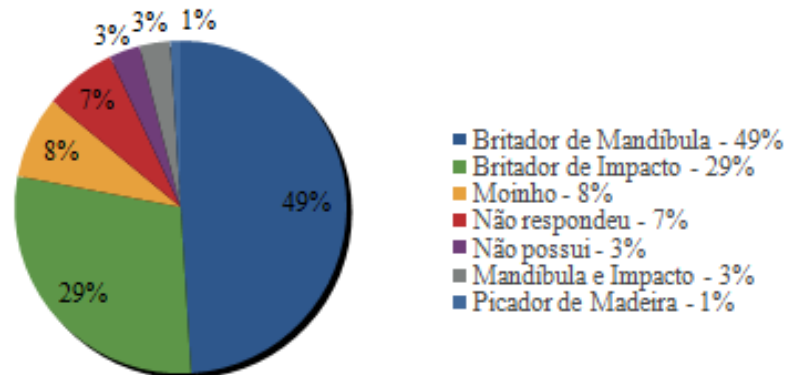
Tseng (2010) analisou comparativamente sistemas de britagem (de mandíbula e impacto) na produção de agregados reciclados provenientes de antigas placas de pavimentos de concreto e observou que os agregados obtidos por esses diferentes britadores apresentaram características muito semelhantes na forma das partículas, distribuição granulométrica, abrasão Los Angeles, absorção de água e composição química. O estudo permitiu afirmar que há pouca influência significativa do tipo do britador sobre as propriedades dos agregados reciclados.

Por outro lado, é dito no setor da reciclagem que os britadores de impacto geram um teor menor de partículas finas $< 75 \mu\text{m}$ e agregados mais cúbicos. Entretanto, pouco se sabe sobre até onde a diferença entre os britadores pode impactar no desempenho do agregado reciclado utilizado, por exemplo, em obras de pavimentação.

No Relatório de Pesquisa Setorial (ABRECON, 2013) sobre reciclagem no Brasil, foram levantadas 310 empresas que, de alguma forma, estão relacionadas à reciclagem de RCD (usinas, aterros, fabricantes de equipamentos) das quais 112 responderam a questionários da pesquisa que serviram de base para o levantamento de dados. Das usinas entrevistadas, 83% utilizam o sistema fixo de reciclagem e apenas 17% o sistema de usina móvel. No que diz respeito ao tipo de britador utilizado em cada usina, 49% optam pelo britador de mandíbula, 29% pelo britador de impacto e os 22% restantes englobam demais casos: usinas que empregam outros tipos de britagem, usinas que não responderam sobre o britador ou que não possuem equipamentos de britagem. Esses resultados podem ser conferidos na FIGURA 2. A preferência nacional pelos dois tipos principais de britadores de mandíbula e de impacto conduz à procura pela sua diferenciação, visto que o tipo de britador utilizado pode influenciar nas características do produto final.

Associado a isso, pondera-se também a compreensão detalhada dos processos e dos equipamentos de britagem, já que estes influem nas características finais dos agregados de britagem. Cabe salientar que a quantidade de material processado também afeta a granulometria do produto britado.

FIGURA 2 - ESTATÍSTICA DE TIPO DE BRITADOR POR USINA NO BRASIL



FONTE: ADAPTADO DE ABRECON (2013).

No que tange à pavimentação, os agregados correspondem a mais de 90% do peso das misturas utilizadas, sendo de fundamental importância nos estudos de aplicação em base e sub-base de pavimento (CARNEIRO et al., 2001). O uso do agregado reciclado em pavimentação é uma alternativa interessante ao substituir materiais naturais, não renováveis, levando em conta os milhares de quilômetros de vias brasileiras ainda não pavimentadas (LEITE, 2007).

Entretanto, este produto ainda possui desvantagem comercial, pois o incentivo ao seu consumo, no Brasil, é dependente da administração pública, uma vez que as esferas governamentais controlam a maioria das obras de pavimentação no país (MIRANDA, 2005).

Tendo essa abordagem em vista, qual é a implicância na geração de um material mais apropriado para aplicação em base e sub-base de pavimentos definida pelos dois tipos mais usuais de britagem (mandíbula e impacto), e como mensurar esse efeito? Esta pesquisa tem importância na ordem em que permitirá avaliar se existe ou não a influência do tipo de mecanismo britador sobre as propriedades dos agregados reciclados, quando aplicados em obras de pavimentação. O estudo contribuirá com resultados práticos para o desenvolvimento técnico da reciclagem, com ênfase na escolha dos equipamentos de produção de agregados reciclados segundo a aplicação desejada, ou na desmistificação de teorias até então difundidas no meio técnico. Uma produção mais eficiente, através de equipamentos de britagem adequados, garantirá maior qualidade e durabilidade do material reciclado usado em bases e sub-base de pavimentos.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do tipo de britador (mandíbula ou impacto), empregado em usinas de reciclagem, nas propriedades dos agregados reciclados utilizados em bases e sub-bases de pavimentos.

1.3 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Para a efetivação do objetivo dessa pesquisa, foram realizadas pesquisa bibliográfica e ensaios experimentais, a fim de gerar dados e agregar conhecimento técnico do tema. As amostras de RCD (de concreto ou misto, sendo esse último constituído por frações de material de concreto e cerâmica) britadas nos britadores de mandíbula e de impacto constitui a unidade de análise da pesquisa.

A comparação entre os dois métodos mecânicos de britagem enquadra-se na proposição de Yin (2001), em que o estudo de caso apresenta-se como a estratégia principal quando são levantadas questões do tipo "como e porquê". Essa situação é definida quando o pesquisador tem pouco controle sobre os eventos ou quando o foco é direcionado a fenômenos contemporâneos.

Aplicando a proposição ao tema em estudo, define-se o seguinte questionamento norteador desta pesquisa: como e porque os métodos de britagem podem ter influência sobre as propriedades de agregados reciclados quando aplicados em base e sub-bases de pavimentos?

A pesquisa abarcará abordagens específicas, bem como coleta e análise de dados. Segundo Robson (2002), a coleta de dados inclui observação e análise documental, o que permite trabalhar tanto com evidências quantitativas como qualitativas. Com a finalidade de observar, registrar e analisar os sistemas técnicos, sem a interferência da autora, a pesquisa é caracterizada como descritiva.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O setor da construção civil é responsável por diversos impactos ambientais, tais como uso intenso de recursos naturais não renováveis e a grande geração de resíduos sólidos (JOHN, 2000). Com a urbanização acelerada, que resultou no rápido adensamento das cidades e no crescimento das atividades do setor construtivo, além da larga exploração dos recursos naturais, a geração de resíduos da construção e demolição atingiu índices alarmantes, produto do desperdício nas obras de construções, reformas e demolições (MORAIS, 2006).

A intensa geração de resíduos sólidos da construção civil em cidades de grande e médio portes tem sido motivo de preocupação em diversos países, já que envolve questões de ordem ambiental, social e financeira. Em função disto, muitos pesquisadores, em escala global, têm procurado encontrar alternativas para que os problemas decorrentes deste processo sejam minimizados, ou até mesmo sanados, com vistas à sustentabilidade do setor construtivo (MOTTA, 2005).

A utilização de agregados reciclados aplicados em camadas de base e sub-base de pavimentos são algumas das aplicações mais comuns para o uso de resíduos da construção e demolição. As pesquisas realizadas comprovam a viabilidade do uso do RCD nas camadas inferiores das estradas, apresentando inclusive inúmeras vantagens, como (LEITE, 2007; MOTTA, 2005; CARNEIRO et al., 2001; POON e CHAN, 2006; SILVA e MIRANDA, 2008):

- diminuição da agressão ao meio ambiente, devido à redução da exploração das jazidas minerais, resultado da substituição de materiais naturais por materiais provenientes da reciclagem;
- redução significativa nos custos de aquisição dos materiais, uma vez que os agregados reciclados podem apresentar um custo substancialmente menor do que os agregados convencionais;
- simplicidade dos processos de separação e britagem do agregado reciclado, contribuindo para a redução dos custos;
- utilização de parte do material em granulometria graúda, reduzindo o consumo de energia necessária para a reciclagem de RCD;
- substituição de uma parcela considerável de material natural por materiais reciclados tanto na fração miúda quanto na graúda dos agregados;

- possibilidade do uso de RCD proveniente das mais diversas fontes (materiais cerâmicos, concretos, argamassas, areia, pedras);
- geralmente apresenta baixa expansibilidade, ou seja, com a entrada de água quase não ocorre expansão das camadas compactadas;
- devido à parcela de materiais pozolânicos que eventualmente existam nos agregados reciclados, as camadas de pavimentação podem apresentar capacidade de auto cimentação;
- além de promover a reciclagem, também desenvolve o setor rodoviário que se encontra deficiente e precário;
- é uma aplicação que consome um grande volume de agregados, facilitando o processo de comercialização.

2.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Desde 2003, quando entrou em vigor a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente, a CONAMA nº307/02, os municípios passaram a ter uma maior responsabilidade sobre o gerenciamento dos resíduos da construção civil, sendo obrigados a elaborar o Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil.

No caso de Curitiba, esse programa foi denominado Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. O plano define que o RCD é proveniente de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil. Além disso, também constam as resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros, comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha (CURITIBA, 2004).

O artigo 3º da Resolução CONAMA nº 307/2002, alterada pela Resolução CONAMA nº 348/2004 (artigo 3º, inciso IV), propõe uma classificação mais específica dos RCD, dividida em quatro classes. Dentre as classificações, a classe A, utilizada nesta pesquisa, é composta por resíduos reutilizáveis ou recicláveis, como agregados, produzidas nos canteiros de obras, sendo os principais tipos:

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, meio-fio, etc.).

Angulo e John (2006) afirmam que muitas vezes os resíduos de construção e demolição caracterizam-se como inertes. Esta premissa é muito aceita em estudos nacionais e internacionais, justificada pelo fato dos resíduos serem compostos predominantemente por materiais inorgânicos não metálicos. Estes minerais, compostos por silicatos, aluminatos e carbonatos, em sua maioria advindos das rochas naturais, cimento e cerâmica, não representam grandes riscos ambientais em razão das características químicas e minerais serem próximas aos agregados naturais e solos.

Devido o agravamento da geração de resíduos em algumas cidades, as prefeituras têm apresentado direcionadas ao reuso dos resíduos de construção, a exemplo do caso da cidade de São Paulo. O art. 1º do Decreto Nº 48.075/2006 versa que as obras e serviços de pavimentação das vias públicas do Município de São Paulo deverão ser executados com a utilização de agregados reciclados oriundos de resíduos sólidos da construção civil (SÃO PAULO, 2006).

O agregado reciclado apresenta menor custo de transporte quando comparado ao agregado obtido de jazidas, por ser produzido no interior da cidade. Como exemplo a ser citado, o uso do agregado reciclado reduziu em 18% os custos com pavimentação na cidade de São Paulo (MOTTA, 2005).

Com o intuito de orientar e estabelecer parâmetros sobre o uso de resíduos da construção civil em pavimentação no programa experimental que sequenciará esta pesquisa é prevista a utilização das seguintes normas técnicas regulamentadoras:

- NBR 15115: Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Execução de Camadas de Pavimentação - Procedimentos (ABNT, 2004a);

- NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Estabelece requisitos mínimos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (ABNT, 2004b).

2.2 PROCESSO DE RECICLAGEM

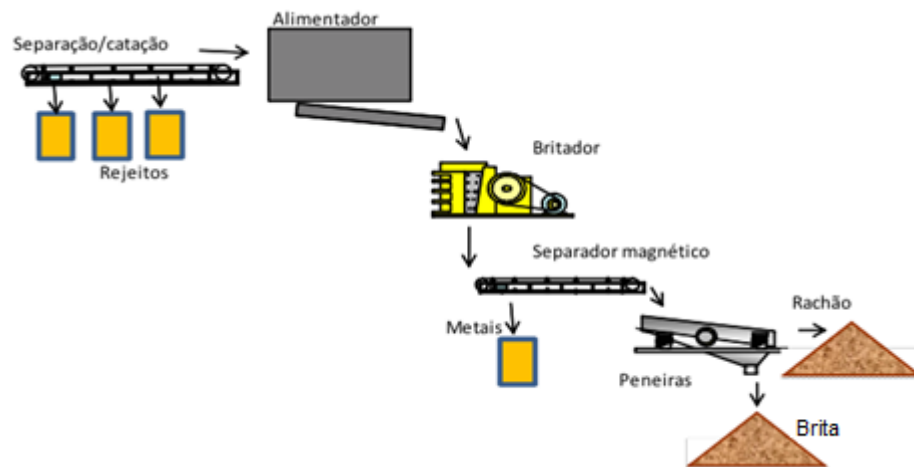
A maioria das centrais brasileiras de reciclagem de resíduos da construção é composta por instalações simples, com equipamentos nacionais, oriundos do setor de mineração. Os equipamentos são aplicados diretamente ou com adaptações no processo de reciclagem, devendo ser basicamente os seguintes (NUNES, 2004): alimentador vibratório; britador; transportadores de correia; extrator de metais ferrosos e conjunto peneira vibratória.

No pátio de recepção, o RCD é classificado visualmente entre vermelho (com maior parte de materiais cerâmicos como tijolos) e cinza (com a maior parte de material cimentício e concreto). Algumas plantas de reciclagem têm chuveiros na entrada para abater poeiras no pátio de recepção (LIMA, 2013).

A brita corrida reciclada tem sido produzida em usinas apenas passando o resíduo de construção civil pelo britador, sem qualquer etapa posterior de peneiramento. Isso faz com que diversas propriedades deste produto, como a granulometria, teor de finos, CBR e expansibilidade apresentem grande variabilidade em cada lote produzido (SILVA e MIRANDA, 2008).

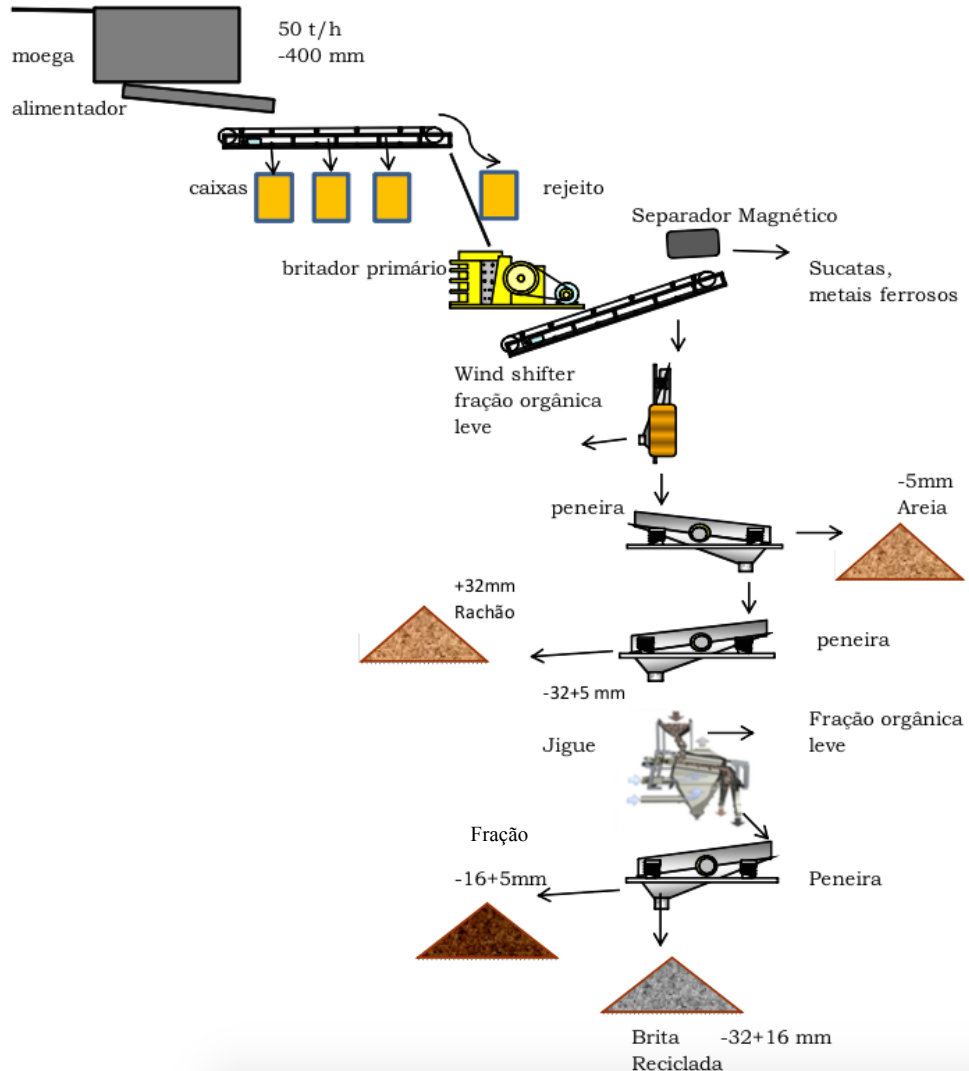
Lima (2013) mostrou um comparativo entre processos (fluxogramas) de reciclagem, um típico do Brasil e outro modelo usado na Europa (Alemanha). A FIGURA 3 mostra o sistema brasileiro, que também é usado na China e a FIGURA 4 o sistema aderido na Alemanha e Holanda.

FIGURA 3 - CIRCUITOS TÍPICOS DA INDÚSTRIA RECICLADORA EMERGENTE EM PAÍSES COMO BRASIL E CHINA PARA PRODUÇÃO DE BRITA E RACHÃO



FONTE: Lima (2013).

FIGURA 4 - CIRCUITO TÍPICO DA INDÚSTRIA RECICLADORA EXISTENTE NA ALEMANHA E HOLANDA PARA OBTENÇÃO DE BRITA DE CONCRETO



FONTE: Adaptado por Lima (2013) Usina VAR em Angulo et al. (2009).

A conclusão de Lima (2013) a respeito desses dois fluxogramas é que os processamentos mostram equipamentos diferentes como o classificador pneumático e o jigue para redução das proporções de finos e de materiais orgânicos leves. Estes equipamentos ainda não são utilizados no Brasil e podem melhorar as propriedades dos agregados reciclados, mas não ao ponto da ausência dos mesmos inviabilizar o uso. A montagem do sistema de certificação de qualidade na rede de consumo de reciclados no Brasil está em processo de estudos do caráter puramente público ou parceria público-privada no caso da auto regulamentação (LIMA, 2013).

2.3 BRITADORES

Antes que se possa falar de tipos de britadores, é essencial a compreensão da atividade desses equipamentos. Em suma, a atividade é a de cominuição, que de forma simplificada, é a quebra/fragmentação de partículas de um determinado material.

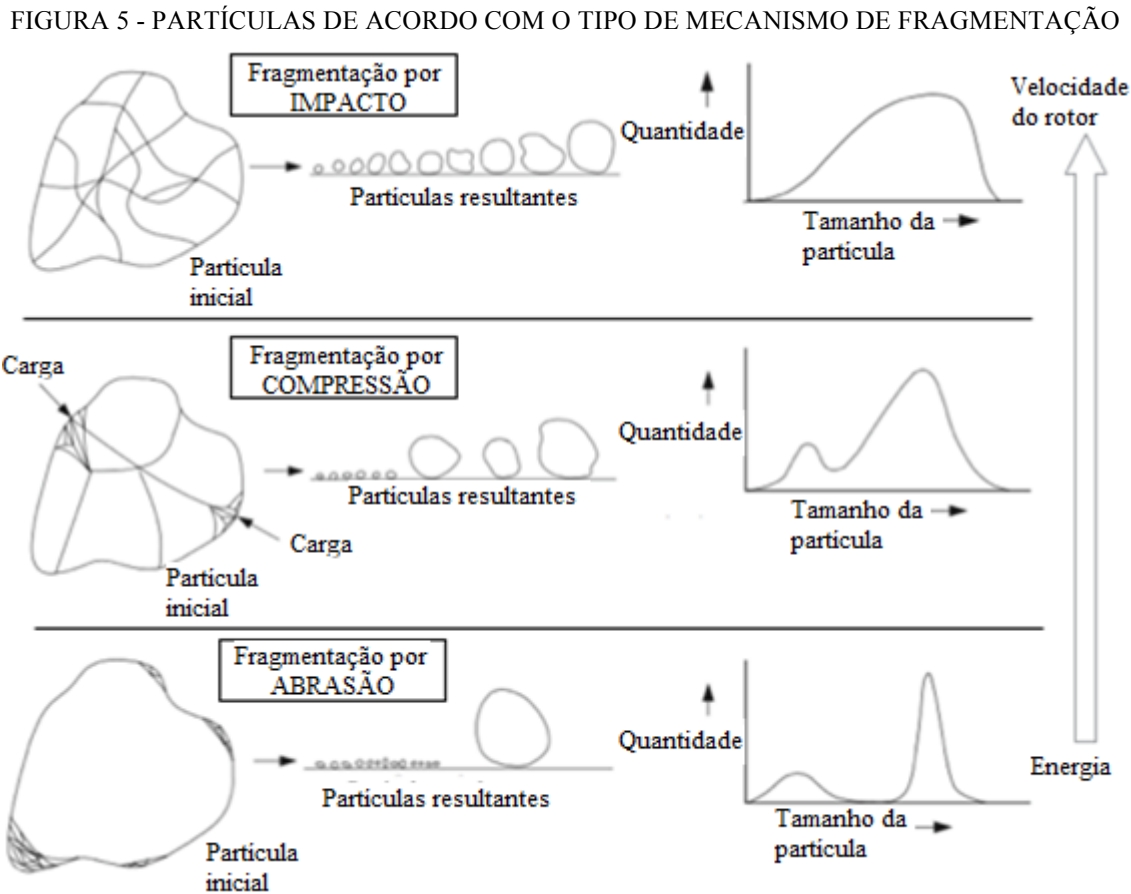
A maior parte dos minerais, constituintes das rochas, são materiais cristalinos em que os átomos estão regularmente dispostos em matrizes tridimensionais. A configuração dos átomos é determinado pelo tamanho e tipos de ligações físicas e químicas que os mantêm juntos. Na rede cristalina de minerais, essa interação atômica é eficaz em pequenas distâncias, e pode ser quebrada com aplicação de uma força externa (WILLS; MUNN, 2006). As principais forças podem ser de impacto (estilhaçamento), compressão e abrasão por cisalhamento.

Na quebra por impacto, com esforços aplicados rapidamente, a partícula sofre uma pressão elevada e como resultado absorve mais energia do que a necessária para uma simples fratura e fragmenta-se principalmente por tensão, não havendo deformação. O produto apresenta-se como partículas de tamanho e forma semelhantes (LUZ et al., 2010). Este mecanismo de fratura é característico de britadores de impacto e é induzido pela aplicação rápida de tensão. Uma gama de tamanhos de partículas é produzida por esse processo. Vários processos de fratura ocorrem de modo que as partículas iniciais são sujeitas, sem interrupções, a uma maior quebra por impactos sucessivos. O processo de cominuição consiste em uma série de etapas em que a partícula inicial é fraturada e sujeita, imediatamente, a mais uma fratura, fazendo com que a britagem seja sequencial e sucessiva até que toda a energia disponível para a fratura se dissipe (KING, 2001).

A fragmentação por compressão ocorre quando o material original tem algumas superfícies preferenciais de ruptura ao longo das quais é provável que ocorra a quebra. Este mecanismo de fratura tende a produzir vários fragmentos relativamente grandes em conjunto com partículas muito finas que se originam nos pontos de aplicação da tensão. A distribuição do tamanho das partículas do produto é relativamente estreita (KING, 2001). Fraturamento típico de britadores de mandíbula, giratórios e cônicos.

Atrito ocorre quando a partícula é grande e as tensões não são suficientemente grandes para causar fratura. Isso geralmente ocorre em moinhos autógenos onde existem as partículas grandes para atuarem como meios de cominuição. Note-se que a partícula inicial dificilmente

muda de tamanho, mas o processo de atrito gera uma quantidade significativa de partículas que são muito menores do que o tamanho original (KING, 2001). A FIGURA 5 traz a representação das partículas de material conforme cada mecanismo de fragmentação.



FONTE: Adaptado de King (2001).

Conceituadas as mecânicas de fraturas, à simples forma, os britadores podem ser classificados em dois grandes conjuntos: dos britadores de compressão e dos britadores de impacto. O primeiro conjunto contempla os britadores de mandíbulas, cônicos, giratórios e de rolo, a forma de britagem é o esmagamento do material até ser quebrado. Já no segundo, a cominuição se dá por rápido impacto contra uma peça de metal ou contra o próprio material, podendo ser ainda dividido em britadores de impacto de eixo horizontal e de eixo vertical (WENDMANN, 2008).

Pondera-se o pleno entendimento dos britadores devido a sua importância na definição da capacidade de uma usina de reciclagem. No mercado existem britadores de diferentes

características e capacidades de processamento, desde 2 t/h até superiores a 350 t/h. Nunes (2004) fez um levantamento da produção média em 14 centros de reciclagem em São Paulo, dentre os centros estudados por ele apenas 7 estavam ativos na época, resultando em uma produção média em torno de 108 t/dia. A produção serve apenas como referência para o tamanho da unidade.

A correta escolha do britador a ser utilizado otimizará os resultados e proporcionará agregados com a granulometria e forma de partículas desejadas, segundo Buttler (2003), e ele ainda ressalta que dependendo do campo de aplicação do material reciclado haverá sempre um britador apropriado para tal. Miranda (2005) lembra da importância de que o dimensionamento do britador não seja feito somente pela sua capacidade de produção horária, mas também pela dimensão máxima de RCD na entrada do processo, condições do projeto, custo, análise do mercado e das vantagens de cada um.

A distribuição granulométrica da alimentação é importante na escolha do tipo de britador. O conteúdo de finos na alimentação define a conveniência ou não de um escalpe prévio da alimentação do britador. Como regra geral, toma-se como base o limite máximo 30% de finos na alimentação. A presença de blocos de grandes dimensões aumenta muito o desgaste em britadores de impacto (LUZ et al., 2010).

2.3.1. Britador de mandíbula

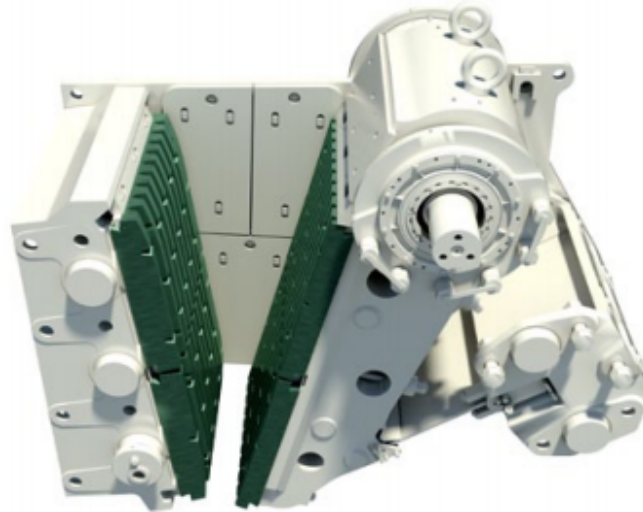
É a fase primária de redução de tamanho de materiais. Seu processo de cominuição se dá pela ação da força de compressão, aplicada através do movimento repetitivo de aproximação e afastamento de uma superfície móvel contra outra fixa.

Os britadores de mandíbulas são classificados em dois tipos, de um e dois eixos. O de um eixo é o mais utilizado, o eixo excêntrico provoca um movimento que aproxima a parte superior da mandíbula móvel da fixa, ao mesmo tempo em que aquela se move para baixo, com uma trajetória elíptica. Esta operação esmaga o material e força-o para baixo. No movimento seguinte, a parte inferior da mandíbula móvel é que se aproxima da fixa, enquanto o eixo excêntrico completa o seu giro (METALÚRGICA SANTA RITA, 2014).

O britador de mandíbulas (FIGURA 6) é recomendado quando se deseja baixa quantidade de finos, ele gera maior quantidade de grãos graúdos, além dos grãos serem de

formato lamelar, mais fracos, com linhas de fratura muito pronunciadas, necessitando de uma britagem secundária (CHAVES e PEREZ, 2012).

FIGURA 6 - CORTE ESQUEMÁTICO DO BRITADOR DE MANDÍBULAS



FONTE: METSO (2015c).

Esse equipamento de britagem não possui restrições quanto às características mecânicas das rochas e materiais abrasivos, mas é menos indicado que o britador de impacto para materiais úmidos com alto teor de argila (LUZ et al., 2010). Cerca de 20% de finos ficam abaixo de 4,8 mm gerando grande porcentagem de material graúdo (HANSEN, 1992).

Levy (2001), ao usar este equipamento em seu estudo, constatou a presença de grãos lamelares tanto nos agregados de concreto quanto nos agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos, em maior quantidade nestes últimos.

A identificação desse britador baseia-se em suas dimensões de sua boca de alimentação (ou entrada). Exemplo: 8050, onde 80 representa a largura útil da boca de alimentação e o 50 a maior distância útil entre as mandíbulas é 50 cm. Dependendo da procedência, estas medidas são em polegadas. Portanto é preciso muito cuidado quanto a este detalhe (METSO, 2015c).

Pela natureza agressiva do trabalho do britador, algumas peças são sujeitas ao desgaste pela abrasão ou erosão do material britado. São denominadas peças de desgaste e devem ser substituídas periodicamente. As principais são: mandíbulas, placas laterais, e calhas. Dentre elas, as mandíbulas são as mais frequentemente trocadas. Sua vida útil pode variar de poucas semanas

a muitos meses, dependendo da abrasividade do material, da abertura de saída, da granulometria e umidade do material (METALÚRGICA SANTA RITA, 2014).

A METSO (2015c) cita alguns pontos importantes para se obter uma ótima capacidade e duração máxima das peças de desgaste. Um deles é que o material de alimentação com dimensões excessivas diminui a capacidade e pode causar tensões desnecessárias nos componentes do britador. Por outro lado, uma dimensão de alimentação pequena aumenta o desgaste na parte inferior da cavidade e pode causar um baixo aproveitamento das peças de desgaste. Para alcançar uma capacidade ótima e maximizar a vida das peças de desgaste, a cavidade do britador deve estar cheia e a alimentação deve estar distribuída uniformemente ao longo da câmara de britagem.

A respeito do bom funcionamento do britador de mandíbulas, além das dimensões adequadas da câmara, é necessário aplicar a cinemática correta. Uma maior excentricidade conjugada com o acentuado ângulo da placa de articulação amplifica o movimento excêntrico efetivo à saída do britador. A operação com aberturas de regulagem reduzidas, o método empregado para a regulagem bem como o movimento longo e linear gerado na parte inferior da câmara de britagem, permite obter produtos mais finos em comparação com outros britadores (METSO, 2015b). A associação de tamanho, peso, dimensões e capacidade da abertura de alimentação equilibrados, assegura que seja possível processar grandes materiais com boa capacidade de produção (METSO, 2015c).

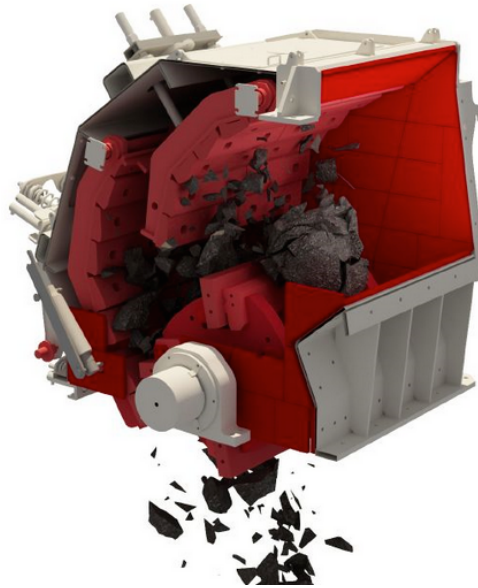
2.3.2. Britador de impacto

Neste tipo de britador, a fragmentação é feita por impacto. As partículas são lançadas contra o revestimento onde sofrem fraturamento adicional. Em geral, as partículas recebem de um a dois choques e tendem a atravessar o equipamento rapidamente. O efeito do impacto é desprezível para partículas menores que 0,15 mm. Dentro de certas limitações mecânicas, aumentando a velocidade do rotor, diminui a granulometria de saída (CHAVES; PERES, 2012). Podem ser de eixo horizontal e vertical.

Estes equipamentos são escolhidos para britagem primária, onde se deseja uma alta razão de redução e alta percentagem de finos. Suas características são: distribuição granulométrica mais fina que a do britador de mandíbulas, mas com menor geração de poeira, uso

limitado a rochas frágeis ou elásticas, efetivo para materiais com tendência a produzir partículas lamelares (gera formas mais cúbicas) e para materiais úmidos com alto teor de argila, alto grau de redução, elevado custo de manutenção e grande desgaste (não sendo aconselhável no caso de rochas abrasivas e de materiais com mais de 15% de sílica), elevada produtividade (LUZ et al., 2010). A FIGURA 7 ilustra um corte esquemático de um britador de impacto.

FIGURA 7 - CORTE ESQUEMÁTICO DO BRITADOR DE IMPACTO



FONTE:METSO (2015a).

Chaves e Peres (2012) citam como características também um fator de redução das partículas de 40:1 e uma quantidade de finos gerados em função da velocidade.

Para uma melhor eficiência desse britador, a METSO (2015a) fabricante de britadores, recomenda a fixação dos martelos ao rotor combinada com seu perfeito alinhamento às faces de contato para garantir a eliminação de vãos entre o rotor e os martelos. Essa recomendação passa a ser uma enorme vantagem que reduz os riscos de quebra de martelos e possibilita o emprego de martelos de ferro fundido.

As empresas que fabricam britador de impacto têm investido em tecnologia avançada na produção desse equipamento. Esse investimento é para possibilitar que britador alcance maiores reduções dos agregados com menos estágios de britagem, diminuindo os dispêndios de capital, economizando energia e diminuindo desgastes de peças e martelos (METSO, 2015a).

2.4 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS

O RCD pode ser constituído por diversos materiais, desde solos, rochas naturais, concreto, argamassa, cerâmica vermelha, amianto, gesso, aço, vidro, papel, madeira, tintas e até restos de vegetais. A sua composição depende de vários fatores, como da fonte do qual foi originado, do tipo e etapa de obra (construção e demolição) e também do momento em que a amostra foi coletada (LOVATO, 2007).

Buttler (2003) indica, baseado em literatura sobre agregados naturais e agregados reciclados de concreto, que entre suas principais diferenças destacam-se, para os agregados reciclados, a menor massa específica, maior absorção de água e principalmente a quantidade de argamassa aderida à superfície dos agregados que influencia desde as propriedades do agregado e do concreto confeccionado com ele, seja no estado fresco ou endurecido.

Em relação à caracterização dos agregados reciclados, vale enfatizar que os ensaios de caracterização devem ser feitos de forma corriqueira, visto que esse material é bastante heterogêneo com características que podem variar em função do tipo de obra, materiais de construção usados ou do período do ano (NÓBREGA et al., 2009).

2.4.1. Granulometria

Os solos e os agregados são constituídos de um grande número de partículas de diferentes dimensões em proporções variadas. A determinação da dimensão dessas partículas e das suas respectivas percentagens de ocorrência permite obter a sua distribuição granulométrica, ou seja, a distribuição percentual da massa que determinadas faixas de tamanho de grãos representam em relação à massa seca total (CARNEIRO et al., 2001).

Através da representação gráfica dos resultados do ensaio de granulometria é obtida a curva granulométrica. Em um gráfico de distribuição granulométrica, o eixo das ordenadas representa as porcentagens acumuladas passando nas peneiras e o eixo das abcissas mostra a abertura das peneiras ou o diâmetro dos grãos em escala logarítmica.

De acordo com a forma da curva obtida é possível classificar granulometricamente o material em: uniforme, bem graduado ou mal graduado. Esta classificação baseia-se no

predomínio, ausência e/ou equilíbrio das frações graúdas e finas por cálculo de índices que expressam a forma da curva (LEITE, 2007).

A curva granulométrica de um solo ou agregado pode se apresentar sob duas formas típicas: granulometria contínua e descontínua.

Na granulometria contínua, estão presentes todos os tamanhos das partículas de um determinado intervalo granulométrico. Isso permite que os grãos menores do material se encaixem nos vazios intergranulares dos maiores, constituindo assim, um material bem compactado, ou seja, mais resistente e menos deformável (CARNEIRO et al., 2001).

As especificações para materiais de base e sub-base de pavimentos estabilizados granulometricamente são apresentadas pela NBR 11804 (ABNT, 1991a), a qual indica a necessidade da curva granulométrica ser contínua e se enquadrar nas faixas granulométricas nela especificadas. Segundo o DNIT (2006) a graduação do agregado, representada pela curva de distribuição granulométrica, é uma das características que asseguram estabilidade aos pavimentos em função do maior atrito interno obtido por entrosamento das partículas, da mais graúda a mais fina.

A NBR 15116 (ABNT, 2004b) especifica que para agregados reciclados, os valores de dimensão máxima característica dos grãos devem ser menor que 63,5 mm e o coeficiente de uniformidade (C_u), que é a relação entre os diâmetros que correspondem a 60% e 10% passantes na curva granulométrica, maior ou igual a 10. O C_u representa a falta de uniformidade granulométrica, pois seu valor diminui quando o material é mais uniforme. Valores baixos de C_u , menores que 15, indicam materiais de uniformidade média ou muito uniforme.

Na opinião de Leite (2007) não é desejável que os agregados apresentem uniformidade, pois dessa forma o material é mal graduado, ocasionando muitos vazios e maiores quebras durante o processo de compactação ou pelo tráfego dos usuários após a conclusão da obra. Motta (2005) estudando laboratorialmente agregados reciclados da cidade de São Paulo encontrou um coeficiente de uniformidade de 42, que satisfaz plenamente à especificação brasileira.

Silva e Miranda (2008) afirmam que o controle da granulometria na produção de agregado reciclado destinado à pavimentação é essencial para a melhoria de sua qualidade. Isto porque os resultados indicam que o controle granulométrico foi útil na redução da variabilidade dos resultados de caracterização da brita corrida reciclada, bem como no aumento dos resultados de CBR (*California Bearing Ratio*).

A formação do material baseado essencialmente na granulometria original pode ser um critério equivocado. Evidentemente há de se limitar certas frações e distribuições que levariam a dificuldades de compactação e comportamento não adequado como material de pavimentação, porém deve-se estar atento às alterações granulométricas após a compactação (MOTTA, 2005).

2.4.2. Índice de forma

De acordo com o DNIT (2006), a forma de um agregado se caracteriza por sua feição exterior relacionada às suas dimensões e também aos seus tipos de arestas e cantos. A determinação da forma da fração graúda do agregado reciclado é realizada de maneira análoga ao especificado na NBR 6954 (ABNT, 1989). Segundo esta norma, devem-se ser medidos altura, largura e comprimento dos grãos para classificar o material como sendo cúbico, alongado, lamelar ou alongado-lamelar.

A natureza dos materiais afeta a forma final do agregado beneficiado (LEITE, 2007) e também o tipo de equipamentos utilizados para a britagem pode gerar agregados mais lamelares e com textura mais áspera que os agregados convencionais.

Em pavimentação, procura-se não utilizar agregados de forma lamelar, pois estes tendem a se quebrar facilmente quando sofrem a aplicação de uma carga e isto pode interferir no arranjo da estrutura de uma camada, vindo a ocasionar alguma patologia como por exemplo, afundamentos por consolidação (MOTTA, 2005). Nos estudos de Nóbrega et al. (2009), sobre agregado reciclado misto, consta o valor de 3,32 para o índice de forma que é um valor alto para esse parâmetro. Silva et al. (2015) estudando a influência do controle granulométrico no desempenho de brita corrida reciclada chegou a valores de índice de forma acima de 3,00. O índice de forma pode ter influência da origem do material ou do equipamento de britagem.

Os grãos de forma cúbica são em sua maioria de natureza cimentícia ou rochosa. Já a forma lamelar é predominante nas partículas de materiais cerâmicos, como as telhas, tijolos, pisos e azulejos. A fração alongada, pouco presente na amostra analisada, também ocorreu principalmente nos grãos de natureza cerâmica (LEITE, 2007).

De acordo com Fernandes (2004), a cubicidade dos agregados reciclados, principalmente aqueles de tipo misto, decorre em partes da sua suscetibilidade ao desgaste superficial das partículas.

Quanto maior a concentração de materiais cerâmicos, maior é a tendência do agregado reciclado em apresentar grãos com forma lamelar; quanto maior a concentração de materiais cimentícios, maior é a tendência do agregado reciclado em apresentar grãos com forma cúbica (LEITE, 2007).

A NBR 15115 (ABNT, 2004a) recomenda que o agregado reciclado tenha no máximo 30% de grãos lamelares.

2.4.3. Teor de finos < 75 μm

Na NBR 11804 (ABNT, 1991) para a execução de camadas estabilizadas granulometricamente, a porcentagem de material que passa pela peneira de 75 μm deve ser inferior a 2/3 da porcentagem que passa pela peneira de 0,42 mm (CARNEIRO et al., 2001).

Segunda a NBR 15115 (ABNT, 2004a), a porcentagem de material passante na peneira 0,42 mm deve ficar entre 10% e 40%. Este item da norma tem por objetivo garantir uma quantidade mínima de material fino no montante de agregado reciclado, para promover um maior embricamento de sua fração graúda.

Motta (2005) detalha o efeito da compactação nas propriedades físicas e mecânicas do agregado reciclado. Em laboratório verificou-se que a graduação do material é alterada com a compactação, e também dependente da energia aplicada. Com o aumento da energia de compactação intensificou-se quebras mais significativas em peso dos agregados graúdos, com produção de agregados de menor dimensão e finos. A maior porcentagem de finos passantes na peneira 75 μm pode ser proveniente de todas as frações que por atrito durante a compactação, mostram desprendimento desses finos.

O processo de britagem e a natureza cerâmica de um material pode propiciar um maior teor de finos em relação ao encontrado em agregados naturais (SILVA et al., 2015).

2.4.4. Massa unitária e massa específica

Razão da massa pelo volume do agregado, onde a massa unitária é determinada incluindo os poros permeáveis das partículas e os vazios entre elas. Ela corresponde à densidade do volume total ocupado pelo sólido, compreendendo todos os vazios (DAMINELI, 2007). É por

meio da massa unitária que se podem transformar as composições das argamassas e concretos dadas em peso para o volume e vice-versa. Também é utilizada para cálculo do índice de vazios de um agregado.

Devido à grande quantidade de argamassa aderida ao material reciclado, a massa específica do agregado de concreto reciclado é cerca de 5 a 10% menor que a massa específica do agregado original (HANSEN, 1985). Poon et al.(2006) e Saeed et al. (2007) confirmaram que a massa específica dos agregados reciclados de concreto é, em geral, inferior a dos agregados naturais. Tal confirmação é aferida pelas conclusões de Barbudo et al. (2012) que diz que os agregados naturais possuem maior densidade na fração graúda, seguido de agregados de concreto reciclado e por última os agregados mistos.

Ao avaliar o controle granulométrico, Silva et al.(2015) constatou um significativo aumento da massa unitária devida à redução do índice de vazios causada pelo ajuste da curva granulométrica.

2.4.5. Absorção de água e teor de argamassa aderida

A absorção é o processo pelo qual um líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. 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 agregado reciclado (CARNEIRO et al., 2001).

A quantidade de água absorvida pelos agregados depende da abundância, tamanho e continuidade dos poros na partícula. A capacidade de absorção é quantidade máxima de água que os agregados podem absorver em função das circunstâncias (TEGGUER, 2012).

Para os agregados reciclados, o conhecimento da cinética de absorção se torna importante, uma vez que é possível corrigir valores de água adicionados à mistura do concreto ou argamassa se não for realizada a pré-saturação dos agregados (DAMINELI, 2007).

A capacidade de absorção de um material está relacionada com a sua porosidade e consequentemente com a sua capacidade de suporte. Muitas propriedades dos agregados podem ser influenciadas pela absorção de água. A alta capacidade de absorção, por exemplo, pode implicar em queda na resistência mecânica por enfraquecimento das ligações intergranulares (FRAZÃO, 2002).

A faixa de valores típicos de absorção dos agregados reciclados de concreto, de acordo com Saeed et al. (2007), varia de 2% a 6% para agregados reciclados graúdos e de 4% a 8% para agregados miúdos.

De acordo com Vieira et al. (2004), os agregados reciclados, diferentemente dos naturais, têm uma alta taxa de absorção de água. Como em agregados graúdos naturais tem-se encontrado teores de absorção inferiores a 2%, podemos afirmar que o agregado reciclado de concreto é muito mais poroso do que o agregado natural (MOTTA, 2005). Grubba (2009) observa em seu estudo que a absorção do agregado reciclado de concreto foi cerca de duas vezes maior do que a do agregado natural. Leite et al. (2011) dizem que o RCD composto em sua maioria por materiais cerâmicos, tais como tijolos e telhas, resultam em um aumento na absorção de água, sendo também predominante a existência de grãos menos cúbicos quanto comparado ao RCD de origem de concreto.

Na TABELA 1 elaborada por Leite (2007) pode-se observar a diferença de absorção entre os agregados reciclados com diferentes tipos de materiais constituintes. Materiais cerâmicos, como telhas e tijolos, apresentam uma absorção muito elevada, comparados com agregados reciclados de materiais cimentícios.

TABELA 1 - TEOR DE ABSORÇÃO PARA FRAÇÃO GRAÚDA DE AGREGADOS RECICLADOS

Composição do agregado reciclado	Procedência	Absorção (%)	Autor
Misto	Santo André/ SP	12,2	Leite (2007)
Misto	Salvador / BA	8,2	Carneiro et al.(2001)
Misto	São Paulo / SP	6,0	Vieira et al. (2004)
Misto	Maceió/ AL	7,8	Motta (2005)
Cerâmico	Hong Kong (China)	19,0	Poon e Chan (2006)
Cimentícia	Flórida (Estados Unidos)	4,4	Chini et al. (2001)

Fonte:Leite (2007).

Barbudo et al. (2012) estudaram agregados reciclados de origem mista e chegaram à conclusão que para esse material a absorção de água é mais elevada na fração fina do que para os agregados naturais. No entanto, na fração graúda, absorção de água é altamente influenciada pela

porcentagem relativa de argamassa aderida e fragmentos de alvenaria para os agregados reciclados.

Poon e Chan (2006) também alegam a maior absorção de água nos agregados reciclados devido à presença de argamassa aderida a seus grãos. E sobre a origem, de concreto ou mista, agregados reciclados de composição cerâmica apresentam absorção significativamente maior que agregados de composição cimentícia, pois quanto mais material cerâmico, mais poroso será o conjunto (LEITE, 2007).

Analisando os dados apresentados pelos diversos autores, pode-se concluir que quanto maior a concentração de materiais cerâmicos com porosidade elevada, como telhas e tijolos, maior será a absorção do conjunto agregado reciclado, e menor a massa específica dos grãos. Estes resultados influenciarão diretamente na compactação realizada com estes agregados. Além disto, a quantidade de água que deverá ser adicionada ao mesmo por ocasião de sua compactação será maior que a necessária caso fossem utilizados materiais pétreos convencionais (MOTTA, 2005).

Hawlitshchek (2014) constatou que a porosidade, oriunda da pasta de cimento remanescente de construções anteriores aderida ao grão, é a propriedade que mais interfere nas características do agregado reciclado, uma vez que implicará também no aumento da área superficial e conseqüentemente à maior absorção de água.

Para Neno (2010) a característica na qual o agregado reciclado mais difere dos agregados convencionais é a absorção de água. Buttler (2003), Poon e Chan (2006), Grubba (2009) explicam esse fato através da presença de argamassa aderida nos grãos do agregado de resíduos de construção.

Para Sturtevant (2007), maiores quantidades de argamassa de cimento aderida significam maior porosidade do material, levando a uma menor massa específica, maior absorção de água, menor resistência à abrasão, características indesejáveis para o agregado. Portanto, é desejável que o método de britagem utilizado consiga remover o máximo de argamassa aderida possível.

A quantidade de argamassa (cimento mais areia) aderida tende a ser maior quando o tamanho dos agregados reciclados é menor (HANSEN, 1992). Essa afirmação só endossa os estudos de Hansen e Narud (1983) nos quais, analisando várias propriedades dos agregados reciclados e dos concretos que incorporam esses agregados, concluíram que aproximadamente

30% da argamassa encontra-se aderida aos agregados graúdos reciclados com dimensão máxima característica entre 16 e 32 mm. Nos agregados graúdos de dimensão entre 8 e 16 mm o valor para argamassa aderida é de 40%, e de até 60% para o agregados de dimensão 4 a 8 mm.

2.5 USO DE AGREGADO RECICLADO EM BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO

Leite (2007) destaca que o uso do agregado reciclado em pavimentação é uma alternativa muito interessante para substituir materiais naturais, não renováveis, principalmente para os milhares de quilômetros de vias brasileiras ainda não pavimentadas. Nóbrega et al. (2009) concluíram que o agregado reciclado coletado na usina de reciclagem da cidade de João Pessoa apresentava boas condições técnicas para aplicação em camada de sub-base de pavimentos urbanos, pois em sua maioria apresentou resultados dentro dos requisitos de norma para parâmetros de: granulometria, dimensão máxima característica e Índice Suporte Califórnia. Investimentos no setor de pavimentação atrelados ao uso de agregados reciclados seriam vantajosos à pavimentação nacional, pois dados do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (hoje corresponde ao DNIT) do ano de 2005, cerca de 88% da malha rodoviária nacional não era pavimentada (COPPEAD, 2007).

Quanto à aplicação em estradas rurais, pode-se citar a pesquisa de Jiménez et al. (2012) sobre utilização de agregados reciclados de concreto na base em substituição do agregado natural compactado. O RCD de origem de concreto estatisticamente obteve o mesmo desempenho do agregado natural no teste de carga estática mesmo depois de três anos da sua construção e a densidade seca houve um aumento de 4% nesse período.

A durabilidade do agregado reciclado ao longo da vida útil do pavimento é um assunto que ainda gera muitos questionamentos (NATAATMADJA e TAN, 2001). Por isto muitos órgãos que regulamentam o uso deste material em pavimentação não permitem ou estabelecem restrições sobre o uso em camadas de base. Para empregar o agregado reciclado é muito importante conhecer as especificações e normas existentes, procurando respeitar sempre as recomendações e limites estabelecidos (BENNERT et al., 2000; BLANKENAGEL e GUTHRIE, 2006).

Para Motta (2005) a utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em camadas de base e sub-base apresenta diversas vantagens às

administrações municipais. O maior atrativo para emprego de agregados reciclados em camadas de pavimento é o fator econômico, uma vez que esses materiais têm sido vendidos, geralmente, a preços inferiores aos dos convencionalmente utilizados em pavimentação.

De acordo com Carneiro et al. (2001), a utilização de RCD dessa forma é a maneira mais simples de aproveitamento por exigir processos de reciclagem menos sofisticados.

A partir de julho de 2007, os projetos prevendo materiais reciclados começaram a ser obrigatórios em São Paulo, nos casos onde há viabilidade técnica (PMSP, 2008).

Para o uso de RCD em camadas de pavimentos a NBR 15116 (ABNT, 2004b) traz parâmetros a serem seguidos para que o material tenha o desempenho apropriado para esse uso (TABELA 2).

TABELA 2 - PROPRIEDADES ESTABELECIDAS PELA NBR 15116 PARA USO DO AGREGADO RECICLADO EM BASE E SUB-BASE

Propriedades		Agregado reciclado Classe A	
Composição granulométrica		Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$	
Dimensão máxima característica		$\leq 63,5$ mm	
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm		Entre 10% e 40%	
-		Base	Sub-base
Capacidade de suporte e expansibilidade	ISC (CBR)%	≥ 60	≥ 20
	Expansão %	$\leq 0,5$	$\leq 1,0$
	Energia de compactação	Intermediária ou modificada	Intermediária

FONTE: Adaptado ABNT (2004b).

2.5.1. Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles tem o objetivo de avaliar o desgaste dos agregados utilizados em camadas de pavimentação quando submetidos à ação de impacto e de atrito

provocado pelo tráfego, e sob a qual um agregado pode vir a se desgastar deixando de atender as especificações para o qual ele foi estruturado.

A norma DNER-ME 035 (1998) descreve o resultado do ensaio de abrasão como sendo o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 rpm a 33 rpm. O valor obtido é convencionalmente expresso pela porcentagem em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7 mm.

A NBR 15115 (ABNT, 2004a), que trata da execução das camadas de pavimentos com agregados reciclados, não menciona valores limites para a resistência à abrasão como requisito para a utilização de agregados reciclados de RCD em pavimentação.

De acordo com FHWA (1997), os valores comumente encontrados para abrasão variam entre 20 e 45%. Nóbrega et al. (2009) encontraram para o parâmetros de abrasão em agregados reciclados o valor de 65%, índice considerado alto.

No estudo de Grubba (2009) observou-se que a resistência à abrasão média do agregado reciclado de concreto foi de 34%, enquanto a do agregado natural foi de 21%. No referido trabalho, tanto o agregado reciclado de concreto quanto o agregado natural apresentaram valores bem inferiores ao máximo especificado por norma. No tocante à resistência à abrasão Los Angeles, constata-se que o agregado reciclado de concreto geralmente apresenta desgaste superior ao verificado nos agregados naturais.

Geralmente, a abrasão Los Angeles dos agregados reciclados do concreto é maior do que a dos agregados naturais, porém bem inferior aos valores observados em agregados reciclados mistos (GRUBBA, 2009).

A porcentagem relativamente elevada de abrasão Los Angeles apresentada por alguns agregados reciclados, quando comparado com algumas normas apresentadas para outros tipos de agregados, não deve significar que o reciclado não possa ser considerado para o uso em pavimentação (MOTTA, 2005). A especificação DNER-ME 035 (1998) sugere que a interpretação dos resultados obtidos pelo ensaio de abrasão Los Angeles devem considerar a origem do material, sua estrutura mineralógica e a respectiva aplicação.

2.5.2. Índice de Suporte Califórnia e expansibilidade

Para definição do valor da capacidade de suporte de solos e materiais granulares a serem empregados em pavimentação utiliza-se o Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR). O ensaio consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão em um corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração num material granular padrão de referência (DNIT, 2006).

Pela NBR 15116 (ABNT, 2004b), os valores de CBR para reforço subleito, sub-base e base são, respectivamente, ≥ 12 , 20 e 60%. No estudo de Motta et al. (2004) encontraram-se valores de CBR de 70%, sendo os RCD aceitáveis em aplicação de vias com volume de tráfego $N < 10^6$ repetições do eixo-padrão de 80 kN.

Os ISC obtidos para o agregado reciclado da pesquisa de Leite (2007) são próximos aos valores verificados para agregados do tipo misto em outros trabalhos, como o FHWA (1997), os valores de ISC para agregados reciclados de concreto apresentam-se entre 94% e 148%, enquanto para uma brita graduada o ISC típico é de 100%. Para os estudos de Saeed et al. (2007), este parâmetro varia de 94% a 184%. Como há uma variação significativa para os valores de ISC, recomenda-se a avaliação do comportamento mecânico do agregado reciclado por outros experimentos.

Mais recentemente, Nóbrega et al. (2009), com os valores de umidade ótima e massa específica seca máxima, moldaram corpos de prova para a realização dos ensaios de Índice Suporte Califórnia. De acordo com os valores obtidos nos ensaios, o agregado reciclado teve capacidade técnica para aplicação na camada de sub-base, já que apresentou ISC mínimo de 26,8% superior aos 20% exigidos por norma e a expansão máxima de 0,42% obtida foi inferior a 1%. Fucale e Proença (2014) chegaram ao valor de 95,2% de ISC, utilizando energia de compactação intermediária, valor referente ao ensaio com agregado reciclado misto. A TABELA 3 mostra alguns valores de ISC obtidos por vários pesquisadores.

TABELA 3 - VALORES DE ISC PARA DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS RECICLADOS

Composição do agregado reciclado	Procedência	Energia de compactação	Umidade ótima (%)	ISC (%)	Autor da pesquisa
Misto	Santo André-Brasil	Intermediária	14,6	73,0	Leite (2007)
		Modificada	13,5	117,0	
Misto	Goiânia - Brasil	Intermediária	14,5	88,0	Mendes et al. (2001)
Misto	São Paulo - Brasil	Intermediária	11,0	11,0	Motta (2005)
Concreto	Estados Unidos	-	-	94 até 148	FHWA (1997)
Concreto	China	Normal	11,8	66,0	Poon e Chan (2006)
Branco	Florianópolis	Normal	12,0	26,0	Ribeiro et al. (2001)
Vermelho			13,0	24,0	

FONTE: Leite (2007).

2.5.3. Índice de degradação após compactação Proctor

A degradação de um material pode ser analisada através da comparação das curvas granulométricas antes e depois de sua compactação (GRUBBA, 2009).

O ensaio de degradação tem como objetivo o comportamento do material em função do desgaste sofrido durante a compactação. Para isto, é realizado o ensaio de granulometria antes e após a compactação, para verificar se a ação da compactação modificou a curva granulométrica do material. Os valores críticos do índice de degradação ocorrem quando a curva granulométrica ultrapassa os limites especificados para a faixa adotada, ou quando é possível identificar uma brusca inflexão da curva granulométrica, causada por uma fratura mais significativa de certo tamanhos de partículas (CARNEIRO et al., 2001).

De acordo com Valle (1994) é importante conhecer o potencial de degradação de agregados, para que se possa avaliar o comportamento do pavimento e interpretar seu funcionamento estrutural.

Para a determinação desse parâmetro utiliza-se o índice de degradação (ID) de Ruiz que é obtido a partir do somatório dos deslocamentos Δ_i da curva granulométrica em cada peneira,

dividido pelo número de peneiras usadas no ensaio. Dessa forma o ID igual a zero define um agregado ideal, resistente a degradação. O valor máximo de ID será 100, definindo um agregado de péssima qualidade (VALLE, 1994).

Índices elevados de degradação indicam a fragmentação parcial dos grãos durante o processo de compactação. A quebra do grão resulta numa mudança na granulometria do material, possibilitando o aumento do grau de entrosamento das partículas, que por sua vez influi na coesão e resistência do material, nas camadas compactadas (CARNEIRO et al., 2001).

Grubba (2009) obteve uma degradação pouco significativa em agregados reciclados de concreto. A diferença média de percentual por peneira foi de apenas 2,8%, sendo a maior diferença na peneira de número 40 (0,042 mm) aproximadamente 5%.

No estudo de Leite (2007), os valores médios do índice de degradação para agregado reciclado de Santo André/SP foi de 3,7% para energia intermediária e 6,3% para energia modificada, sendo a maior diferença encontrada na peneira 0,60 mm de 5,1% para energia intermediária e na peneira 25,0 mm de 8,1% para energia modificada. Através desse estudo pode-se concluir que o índice de degradação cresce com o aumento da energia de compactação.

Acredita-se que essa diferença de resistência à quebra durante a compactação se deva à natureza dos materiais constituintes no agregado reciclado (GRUBBA, 2009).

Apesar da NBR 15116 (ABNT, 2004b) prescrever aspectos referentes à granulometria, durante a aplicação e compactação ocorrem alterações significativas, sendo a análise desta degradação do agregado importante, pois um material que a princípio não atenderia ao critério de projeto, após a sua compactação e conseqüentemente sua quebra poderá se tornar de acordo com o especificado, ou vice-versa.

2.5.4. Resiliência

Neste ensaio, o corpo de prova é submetido a cargas repetidas, de baixa intensidade, por um intervalo de tempo curto, que procuram simular em laboratório as condições de carregamento impostas pelo tráfego na estrutura do pavimento. Um ciclo de carregamento é o somatório do tempo de aplicação de carga, 0,1s e do tempo de repouso entre aplicações sucessivas, 0,9s (GRUBBA, 2009).

Na pesquisa de Fernandes (2004), a granulometria do agregado reciclado e a energia de compactação empregada influenciaram pouco nos módulos de resiliência. A principal responsável pela diferença nos valores foi a composição do agregado reciclado. Em sua pesquisa, os agregados de concreto apresentaram módulos superiores aos agregados mistos. Os materiais convencionais analisados (brita graduada simples) apresentaram valores de módulos de resiliência superiores aos agregados reciclados.

Nataatmadja e Tan (2001) investigaram o comportamento resiliente de agregados reciclados de concreto empregados na construção de camadas de base e sub-base de pavimentos. Nessa pesquisa foram analisadas quatro amostras de agregado reciclados proveniente de concretos com resistência à compressão simples de 15, 18, 49 e 75 MPa. Com base nos resultados obtidos, os pesquisadores concluíram que quanto maior a resistência do concreto de origem do resíduo maior são os valores de módulo de resiliência dos agregados reciclados. Além disso, os autores afirmaram que o agregado reciclado apresentou um comportamento resiliente semelhante ao dos agregados convencionais utilizados em pavimentação.

2.5.5. Compactação

A compactação de um material para ser utilizado como camada constituinte de um pavimento permite aumentar a sua densificação e assim reduzir o índice de vazios. Este processo implica na melhoria de diversas propriedades, como o aumento da resistência ao cisalhamento e diminuição da deformabilidade. Além disso, o aumento do contato entre os grãos torna o conjunto mais estável (DNIT, 2006; PINTO, 1999).

Motta (2005) relata que em seus experimentos a graduação do material foi alterada com a compactação e ainda com a alteração da energia aplicada. Com o aumento da energia intensificou-se quebras mais significativas em peso dos agregados graúdos, resultando em agregados de menor dimensão e finos.

Molennar e Nicekerk (2002) estudaram em laboratório os efeitos da graduação, composição e grau de compactação do agregado reciclado nas suas propriedades mecânicas. Concluíram que a composição e a granulometria influem no desempenho do agregado reciclado para utilização em camadas de bases e sub-bases de pavimentos, porém o grau de compactação é o fator que se mostrou mais relevante. Os autores acrescentam ainda que a granulometria e a

composição dos agregados reciclados são fatores de difícil controle, representando assim uma desvantagem ao uso deste tipo de material.

Porém, esta opinião não parece ser consenso no meio técnico. Silva e Miranda (2008) mostraram que é possível manter o controle granulométrico do agregado reciclado produzido em usina. Também a composição do material pode ter sua variabilidade reduzida através da separação do RCD na usina em cinza e vermelho, então dosando a proporção de cada um no momento da britagem.

A compactação é um método para melhoramento da estabilização das camadas através da aplicação de uma energia, podendo ser ela por impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica.

A intensidade da energia de compactação pode ser variada, sendo ela chamada de normal, intermediária ou modificada. A variação dessas energias altera as propriedades do material: quanto maior a energia de compactação menor será o valor do teor de umidade e consequentemente maior o valor do peso específico seco máximo. A NBR 15115 (ABNT, 2004a) recomenda no mínimo a energia intermediária para o emprego na construção de base.

Segundo Leite et al. (2011), o processo de compactação, no uso em base de estradas, pode alterar a distribuição da dimensão de grãos. Os agregados podem apresentar uma quebra durante a compactação, modificando a forma dos grãos e aumentando a quantidade de grãos cúbicos.

Para a execução do ensaio segundo a NBR 7182 (ABNT, 1988) é necessário obter pontos dois pontos acima e dois pontos na curva e um ponto próximo da curva de compactação abaixo da umidade ótima. A partir dos valores encontrados na literatura para agregados reciclados de diferentes composições, é possível verificar valores similares, em média, de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo (TABELA 4).

TABELA 4 - VALORES DE COMPACTAÇÃO PARA DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS RECICLADOS

Composição do agregado reciclado	Procedência	Energia de compactação	Peso específico seco máximo (kN/m ³)	Umidade ótima (%)	Autor
Misto	Santo André-Brasil	Intermediária	17,60	14,6	Leite (2007)
		Modificada	18,30	13,5	
Misto	São Paulo - Brasil	Intermediária	18,30	11,0	Motta (2005)
Misto	Uberlândia - Brasil	Intermediária	19,80	9,3	Moreira et al. (2006)
		Modificada	20,50	9,1	
Misto	Rio de Janeiro - Brasil	Intermediária	18,30	13,8	Fernandes (2004)
		Modificada	18,50	12,5	
Concreto	Rio de Janeiro - Brasil	Intermediária	17,90	15,2	Fernandes (2004)
		Modificada	18,30	14,1	
Concreto	São Paulo - Brasil	Intermediária	18,34	12,0	Grubba (2009)
		Modificada	18,91	11,0	
Concreto	Estados Unidos	Normal	18,70	5,0	Bennert et al. (2006)
Concreto	Estados Unidos	Modificada	17,95	9,7	Blankenagel et al. (2006)
Concreto	Austrália	Modificada	19,60	9,5	Nataatmadja e Tan (2001)
Concreto	China	-	19,82	11,8	Poon et al. (2006)
Concreto	Coreia	Modificada	21,68	9,0	Park (2003)
Concreto	Suécia	Modificada	19,62	9,4	Arm (2001)

FONTE: Leite (2007).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esse capítulo apresenta a descrição dos procedimentos experimentais realizados: coleta de amostras; caracterização inicial dos agregados; caracterização para a aplicação em estudo (base e sub-base de pavimentação); coleta de dados e análise dos mesmos. Para a realização dos ensaios aplicaram-se procedimentos normatizados e não normatizados, esses últimos tiveram um embasamento científico ou tecnológico para justificar o seu uso.

Para melhor entendimento do decorrer do estudo sobre os equipamentos de britagem, foi elaborado um fluxograma das atividades realizadas (FIGURA 8).

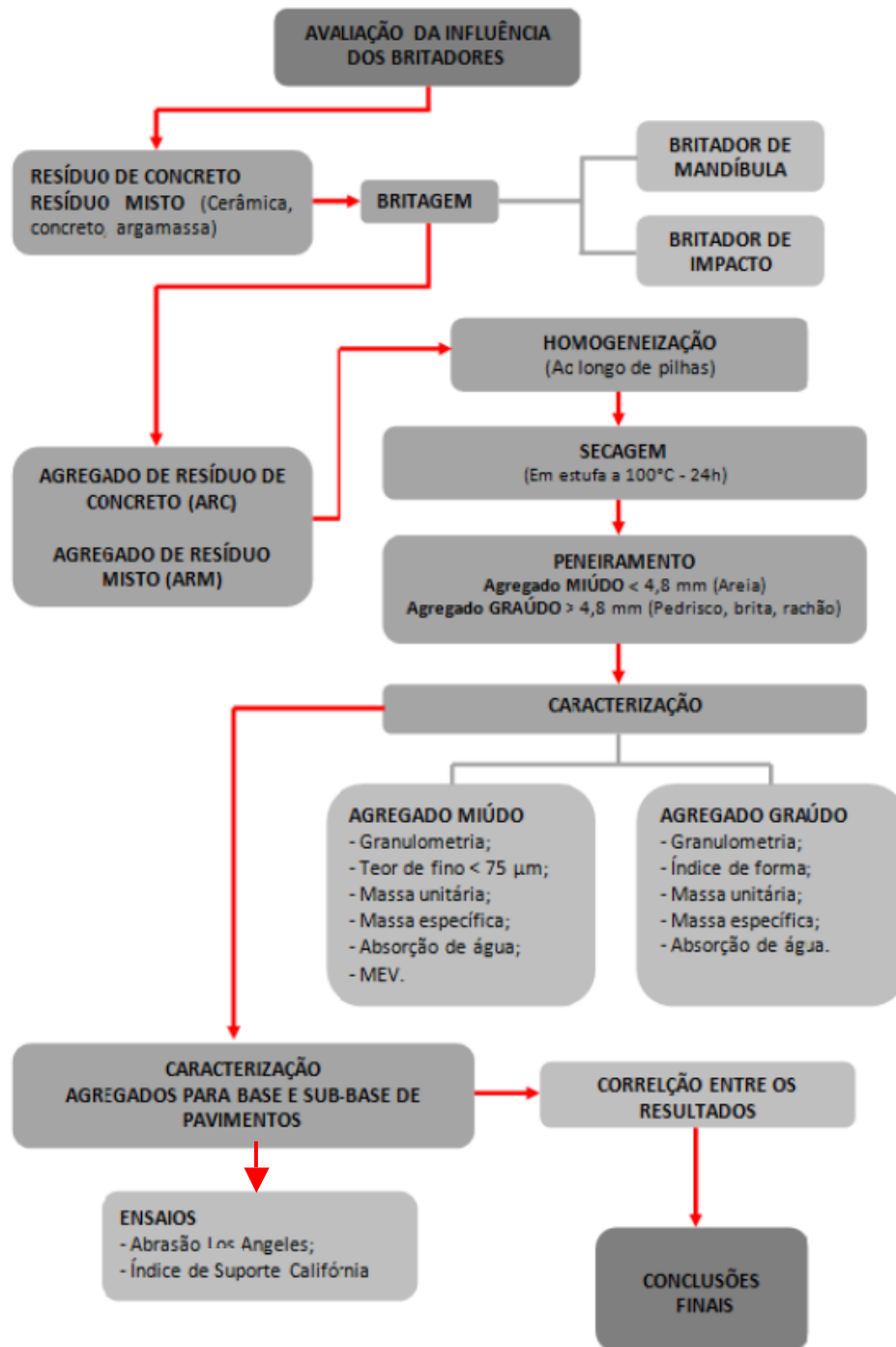
O ponto inicial da representação gráfica criada aborda o objetivo e foco desta pesquisa que é a avaliação da influência dos britadores, seguida da exposição do tipo de material a ser processado nos equipamento de britagem, podendo ser ele proveniente de resíduos apenas de concreto e de cerâmica e concreto misturados.

No processo de britagem se tem a variação dos mecanismos britadores, sendo eles o britador de mandíbula e o de impacto. Após a prática de cominuição o RCD (concreto e misto) passa a ser ARC (agregado de resíduo de concreto) e ARM (agregado de resíduo misto). A fim de se garantir a integridade das amostras, efetuou-se a etapa de homogeneização em pilhas para que então as porções de material passassem pela fase de secagem em estufa (100°C) e posteriormente pelo processo de peneiramento, separando as amostras em fração miúda (fração passante na peneira de abertura 4,8 mm) e graúda (fração retida na peneira de abertura 4,8 mm).

Concluído o estágio preliminar até aqui descrito, estabeleceu-se a caracterização inicial dos agregados reciclados, separada em ensaios para agregados miúdos e em ensaios para agregados graúdos. Por continuidade, realizaram-se os ensaios específicos que caracterizam o uso dos agregados em aplicação de pavimentação nas camadas de base e sub-bases.

A finalização dos ensaios possibilitou a interpretação de resultados e correlações entre eles que assessoraram a conclusão desta pesquisa.

FIGURA 8 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL



FONTE: A autora (2015)

O detalhamento das etapas do fluxograma será apresentado nos itens a seguir, atentando sempre em descrever cada atividade.

3.1 AMOSTRAGEM

Como o objetivo principal desta pesquisa é a diferenciação do material proveniente de britadores de mandíbula e impacto para a aplicação desse material em bases e sub-bases de pavimentos, foram coletadas amostras específicas para que as mesmas fossem processadas nos equipamentos de britagem em estudo. Procurou-se escolher britadores que possuíssem a mesma capacidade de produção (50 t/h) para assim poder comparar um equipamento com outro no quesito britagem, e da mesma forma também o parâmetro de diâmetro máximo (150 mm) de agregado produzido.

Duas usinas de reciclagem colaboraram para a obtenção do produto de diferentes britadores, mandíbula e impacto. Uma delas foi a URBEM - Usina de Reciclagem e Beneficiamento de Entulho e materiais, localizada em São Bernardo dos Campos - São Paulo (FIGURA 9), dotada de um britador de impacto de 50t/h com 10 martelos, motor de 50 cv, possuindo abertura de 150 mm. Nesta usina o sistema de peneiramento era dividido em 3 decks (malha de 4,8 mm; 9,5 mm e 38 mm), gerando assim quatro materiais distintos em tamanho.

FIGURA 9 - USINA DE RECICLAGEM URBEM



FONTE: A autora (2015).

A outra usina de reciclagem foi a PROGUARU em Guarulhos - São Paulo (FIGURA 10), equipada com um britador de mandíbula modelo 6040, capacidade de britagem de 50 t/h e *top-size* (abertura do britador) de 101 mm e abertura máxima de 150 mm. As granulometrias

finais produzidas na PROGUARU são baseadas na terminologia da NBR 9935 (ABNT, 2011) adaptado ao seu sistema de peneiramento. As frações que são produzidas nessa usina estão listadas na TABELA 5.

FIGURA 10 - USINA DE RECICLAGEM PROGRARU



FONTE: PROGUARU (2015).

TABELA 5 - SUBDIVISÃO DE AMOSTRAS (PROGUARU)

Tipo	Tamanho (Granulometria)	Similaridade ao natural
Areia Reciclada	0,1 a 4,8 mm	Areia média
Agregado Reciclado AR-1	4,8 a 9,5 mm	Pedrisco
Agregado Reciclado AR-2	9,5 a 25 mm	Pedra 1 e 2
Agregado Reciclado AR-3	25 a 50 mm	Pedra 3
Agregado Reciclado Graúdo	> 50 mm	Rachão

FONTE: PROGUARU (2015).

A URBEM foi a usina responsável por fornecer a matéria-prima que seria britada em ambos os britadores, no britador de impacto na própria URBEM e no britador de mandíbula na PROGUARU. O RCD (de origem concreto e o misto, concreto e cerâmica) que chegava na usina de São Bernardo dos Campos era armazenado em uma grande área aberta, onde também era feita uma separação manual de alguns contaminantes (aço, madeira, plástico, papel, gesso).

Na URBEM foram escolhidos dois lotes, o mais homogêneo possível, de cada tipo de resíduo, um de concreto e outro misto (concreto e cerâmica). Em cada um dos lotes foram coletadas duas remessas de material, uma para ser processada no britador de mandíbula e outra no de impacto. Esse procedimento foi feito em dois momentos, constituindo duas amostras, a “A” e a “B” para que se pudesse ter uma maior confiabilidade nos valores dos resultados.

Tanto para o resíduo de concreto quanto para o misto, a amostra a ser britada foi recolhida de vários pontos dos lotes para se garantir as características da amostra como toda quanto às suas quantidades de finos, miúdos e graúdos. Metade do material recolhido de concreto foi proveniente de grandes peças de concreto, coletadas à mão e colocadas na carregadeira para levar até o alimentador, o qual garante uma vazão de entrada contínua no equipamento de britagem, no caso o britador de impacto na própria URBEM, e antes da britagem cuidou-se para que os equipamentos estivessem limpos de resíduos de outras britagens da usina.

A outra metade do material recolhido de concreto foi armazenada em sacos de rafia para o posterior beneficiamento na PROGUARU, no britador de mandíbulas. A amostra mista foi coletada através de pá, manualmente, e também foi dividida em duas: parte colocada na carregadeira para ser levada até o alimentador e britada no britador de impacto e parte acondicionada em sacos, para posterior britagem no britador de mandíbulas.

O recolhimento dos agregados reciclados após a britagem respectiva deu-se na correia transportadora (FIGURA 11) de cada usina, cuidando atentamente para que todas as frações (finas e grossas) fossem coletadas por completo, garantindo assim a integridade das amostras.

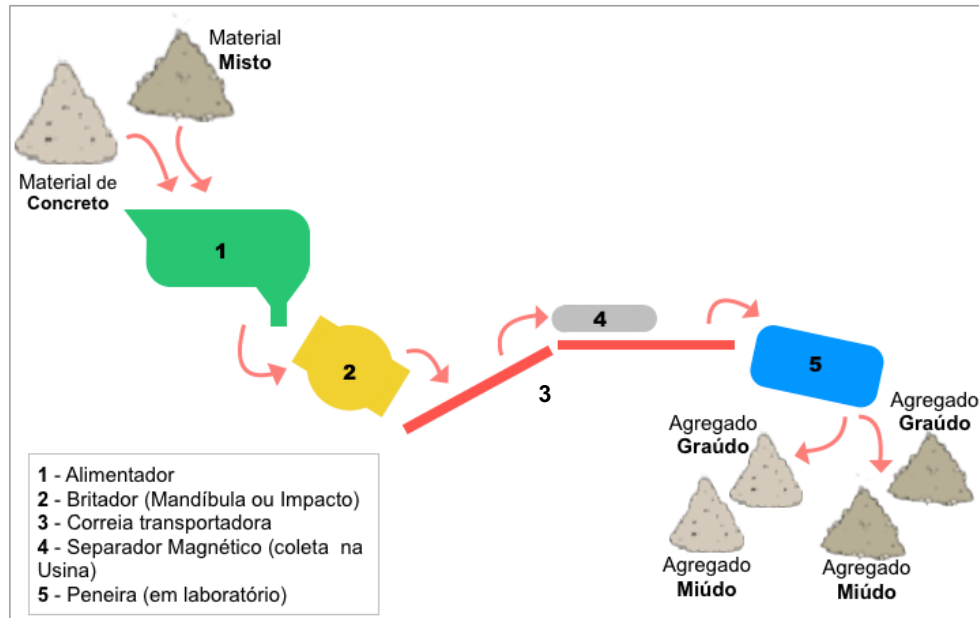
FIGURA 11 - CORREIA TRANSPORTADORA



FONTE: A autora (2015).

A FIGURA 12 resume, de forma genérica, todo o caminho do RCD até se tornar agregado reciclado.

FIGURA 12 - FLUXOGRAMA INICIAL DAS AMOSTRAS



FONTE: A autora (2015).

Após o beneficiamento em cada uma das usinas, o material é conduzido em correias transportadoras até o equipamento de peneiramento e nesse ponto de condução foram coletadas as amostras britadas. Sobre essas correias transportadoras tinha-se a instalação de mecanismos separadores de materiais ferrosos (separadores magnéticos), o material britado e recolhido já vinha sem esses contaminantes.

A primeira remessa de material (Amostra A) foi: 140 kg de material concreto, britado no britador de impacto da URBEM e no britador de mandíbula na PROGUARU; e da mesma forma, 140 kg de material denominado misto, em ambos os britadores. Para uma segunda amostra (Amostra B) decorreram-se os mesmos procedimentos e quantidades da primeira amostra (Amostra A).

As amostras de material oriundo de concreto e de origem mista, após a britagem em ambos os britadores isoladamente, foram homogeneizadas separadamente. Distribuem-se os materiais em uma linha reta, totalizando cerca de 3 m. As pilhas foram constituídas de camadas lineares e seção triangular para se garantir uma diminuição da variabilidade do lote (FIGURA

13). Posteriormente, retiraram-se duas porções de materiais de igual tamanho do meio da pilha com 35 kg cada para as caracterizações do material (FIGURA 14), o restante do material junto com a amostragem de caracterização serviu para ensaios específicos de aplicação em bases e sub-bases de pavimentos.

FIGURA 13 - PILHAS DE HOMOGENEIZAÇÃO



FONTE: A autora (2015).

FIGURA 14 - RETIRADA DA AMOSTRA: (A) DELIMITAÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA. (B) AMOSTRA COLETADA



FONTE: A Autora (2015).

A partir da homogeneização, em uma primeira etapa, dividiram-se as amostras em gráudo e miúdo através do parâmetro de material passante (miúdo) e retido (gráudo) na peneira de abertura 4,8 mm. Com essa divisão realizou-se a granulometria, massa unitária e teor de finos para a representatividade da amostra completa (FIGURA 15).

FIGURA 15 - GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS



FONTE: A autora (2015).

Em seguida o material foi dividido em quatro classificações: areia (material $< 4,8$ mm); pedrisco (material retido na peneira 4,8 mm e passante na 9,5 mm); brita (material retido na 9,5 mm e passante na 25 mm); rachão (material > 25 mm); e então foi realizado o restante dos ensaios de caracterização para cada uma dessas classificações. Optou-se por essa divisão devido ao comumente produzido em usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição.

A FIGURA 16 traz a exemplificação de uma amostra de concreto e mista dividida em rachão, brita e pedrisco. A terminologia areia, pedrisco, brita e rachão foi adotada pela autora a fim de facilitar a apresentação dos resultados, não sendo necessariamente a terminologia estipulada na NBR 9935 (ABNT, 2011).

FIGURA 16 - RACHÃO, BRITA E PEDRISCO DE MATERIAL CONCRETO E MISTO DO BRITADOR DE IMPACTO



FONTE: A autora (2015).

Para melhor esclarecimento da amostragem adotada, formulou-se a TABELA 6, mostrando por amostra (Amostra A e Amostra B) os tipos de britadores utilizados, origem da amostra (resíduos de concreto e resíduos misto), divisão (primeira e segunda etapa), classificação de amostras (rachão, brita, pedrisco e areia) e as siglas adotadas para cada uma das amostras. As siglas serviram para simplificar a apresentação dos resultados e discussões dos mesmos, evitando a escrita completa do nome de cada uma das amostras.

TABELA 6 - SUBDIVISÃO DE AMOSTRAS DA PESQUISA

AMOSTRA	BRITADOR	MATERIAL	DIVISÃO 1	DIVISÃO 2	SIGLAS		
A	Impacto	Concreto	Graúdo	Rachão	ICA		
				Brita			
				Pedrisco			
		Misto	Graúdo	Miúdo	Areia	IMA	
				Rachão			Brita
							Pedrisco
	Mandibula	Concreto	Graúdo	Rachão	MCA		
				Brita			
				Pedrisco			
		Misto	Graúdo	Miúdo	Areia	MMA	
				Rachão			Brita
							Pedrisco
B	Impacto	Concreto	Graúdo	Rachão	ICB		
				Brita			
				Pedrisco			
		Misto	Graúdo	Miúdo	Areia	IMB	
				Rachão			Brita
							Pedrisco
	Mandibula	Concreto	Graúdo	Rachão	MCB		
				Brita			
				Pedrisco			
		Misto	Graúdo	Miúdo	Areia	MMB	
				Rachão			Brita
							Pedrisco

FONTE: A autora (2015).

Todas as amostras depois de classificadas foram armazenadas em sacos plásticos reforçados, etiquetadas e guardadas em caixas organizadoras enquanto não estivessem sendo ensaiadas.

Tomou-se o cuidado de homogeneizar todas as amostras na hora do fracionamento ideal para realização de cada ensaio. Para isso adotou-se, no caso dos agregados miúdos, o redutor de amostras tipo Jones (FIGURA 17) e o agregado graúdo foi reduzido através de quarteamento em laboratório.

FIGURA 17 - REDUTOR DE AMOSTRAS TIPO JONES



FONTE: A autora (2015).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Na caracterização dos agregados reciclados foram necessárias normas que abrangessem tanto os agregados naturais como os reciclados, até porque um dos objetivos do uso do agregado reciclado é a substituição do natural, por isso é importante ter parâmetros compatíveis para essa substituição. Para a análise de algumas propriedades foram realizados ensaios não normatizados, mas que já foram estudados e testados e por isso foram apresentados separadamente (TABELA7).

TABELA 7 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

CARACTERIZAÇÃO	NORMA
Composição granulométrica	NBR NM 248 - 2003
Índice de forma - Agregado graúdo	NBR 7809 - 2008
Teor de finos < 75µm	NBR NM 46 - 2003
Massa unitária	NBR NM 45 - 2006
Massa específica - Agregados graúdos	NBR NM 53 - 2003
Massa específica - Agregados miúdos	NBR NM 52 - 2009
Absorção de água - Agregados miúdos	NBR NM 30 - 2001
Método com forno micro-ondas	-
Absorção de água - Agregados graúdos	NBR NM 53 - 2003
Teor de argamassa aderida - Agregado graúdo	-
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	-

FONTE: A autora (2015).

Para o entendimento da execução dos ensaios complementares, adotou-se uma descrição para cada um deles, sendo eles: absorção dos agregados miúdos; teor de argamassa aderida; tomografia; microscopia eletrônica de varredura (MEV); já eles não possuem norma específica, apenas trabalhos científicos explanando os mesmos.

Os ensaios complementares foram adotados com o objetivo de apurar as características intrínsecas do agregado, sempre visando analisar qualquer interferência da britagem nas propriedades dos agregados.

3.2.1. Ensaio de absorção dos agregados miúdos

Para o ensaio de caracterização da absorção dos agregados miúdos seguiram-se três métodos afim de agregar ao trabalho uma observação mais apurada entre as eficiências dos métodos, sempre procurando notar a diferença entre os britadores.

Os três métodos são: baseado na norma NBR NM 30 (ABNT, 2001a), junto com a fração de material menor que 75 µm; novamente com o procedimento da mesma norma, só que sem a fração fina; e por último o método prescrito na pesquisa Kaneko (2014) que é uma

adaptação dos estudos de Damineli (2007) para agregados graúdos, método que usa o forno micro-ondas como mecanismo de secagem.

Dimineli (2007) propôs em sua dissertação um método de secagem de material graúdo em um ambiente controlado e estável, monitorando os valores de massa até que atingisse uma massa constante. A proposição do método se deu pelo fato da NBR NM 53 (ABNT, 2009a) ser direcionada para agregado natural e não para o reciclado, já que esse último possui características próprias.

Para a realização do ensaio foi utilizado o mesmo conjunto de equipamentos utilizados por Kaneko (2014) (FIGURA 18): balança Shimadzu - Modelo: UX4200H; balão volumétrico PHOX 2000 ml; bomba de vácuo e pressão QUIMIS - Modelo: Q355B; computador *Creative52Xmx* (Sistema operacional: *Windows XP*); micro-ondas PANASONIC 28L - Modelo: NNS56B - Potência nominal 900 W. Um *software* de análise de dados e estatística (*Origin*), com plataforma *Windows*, foi responsável pela importação dos dados dos instrumentos de medidas e processamento dos mesmos. Assim pode-se fazer uma curva representativa dos dados.

FIGURA 18 - CONJUNTO DE SECAGEM



FONTE: A autora (2015).

A amostra foi formada pelo material passante pela peneira 4,8 mm (aproximadamente 150 g), seca 24 horas em estufa a 100°C. Primeiramente o material foi submetido a uma saturação e o método realizado foi a vácuo – 500 mmHg por 30 minutos, o vácuo é então retirado e agitado o recipiente para retirada das bolhas de ar em 1, 3, 5, 10 e 15 minutos do início do ensaio e reaplicada a pressão imediatamente (FIGURA 19).

FIGURA 19 - SATURAÇÃO A VÁCUO



FONTE: A Autora (2015).

Após a saturação, o material miúdo foi colocado em um recipiente suspenso através de uma linha de *nylon* dentro do micro-ondas e acoplado na parte inferior da balança. De acordo com Kaneko (2014) antes de começar o ensaio deve ser feito um pré-aquecimento do conjunto de 45 minutos e após a retirada do excesso de água limpa sobre amostra.

Em seguida reiniciou-se a secagem com a massa da amostra medida em intervalos de 20 segundos através da ligação da balança com um computador até o a taxa de secagem fique linearmente decrescente (momentos próximos à estabilização da massa do conjunto). As medições se deram através de uma tabela com uma coluna contendo os tempos t (período de leitura dos dados) e a massa do conjunto agregado e água relativa a cada instante t . As medições de 20 em 20 segundos se mostraram adequadas à obtenção de taxas de secagem, as quais permitiram a visualização das mudanças de regime de secagem sem perder a precisão do ensaio.

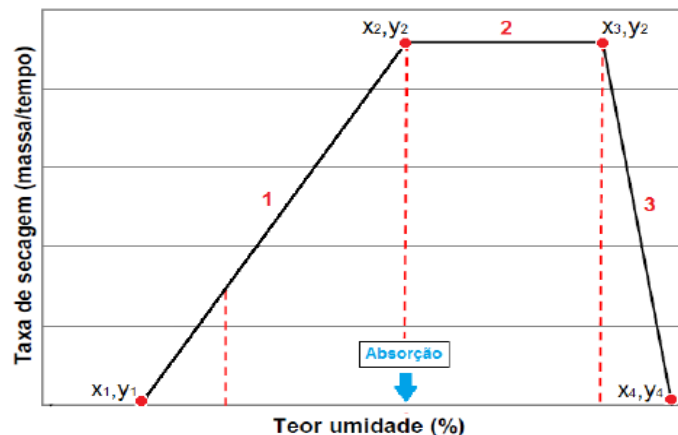
Os resultados obtidos servem para a montagem de um gráfico “Taxa de umidade x Taxa de secagem”, onde: a taxa de secagem pode ser calculada, em cada instante t , pela subtração da massa do conjunto agregado/água do instante (t) em relação ao instante anterior ($t - 1$), dividida pelo próprio intervalo de tempo (EQUAÇÃO 1); o teor de umidade a cada instante (t), em porcentagem, foi obtido pela subtração entre a massa do conjunto agregado/água no instante (t) e a massa seca (M_s), dividido pelo valor da massa seca (M_s), multiplicando o resultado por 100 (EQUAÇÃO 2).

$$\text{Taxa secagem (t)(massa/tempo)} = \frac{M_{\text{conj.agreg/água}(t-1)} - M_{\text{conj.agreg/água}(t)}}{(t) - (t - 1)} \quad (1)$$

$$\text{Taxa umidade (t)(\%)} = \frac{M_{\text{conj.agreg/água}(t)} - M_{\text{seca}}}{M_{\text{seca}}} \quad (2)$$

O gráfico “Taxa de umidade x Taxa de secagem” tem a tendência de crescer no início, no meio mantém uma linearidade e decresce no fim, formando a figura de um trapézio. Para encontrar o valor da umidade foram criadas retas através do programa Origin com uma função que garantisse o menor desvio padrão dos dados em relação às três retas juntas conforme a FIGURA 20.

FIGURA 20 - GRÁFICO-BASE PARA DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO NO ORIGIN



FONTE: Kaneko (2014).

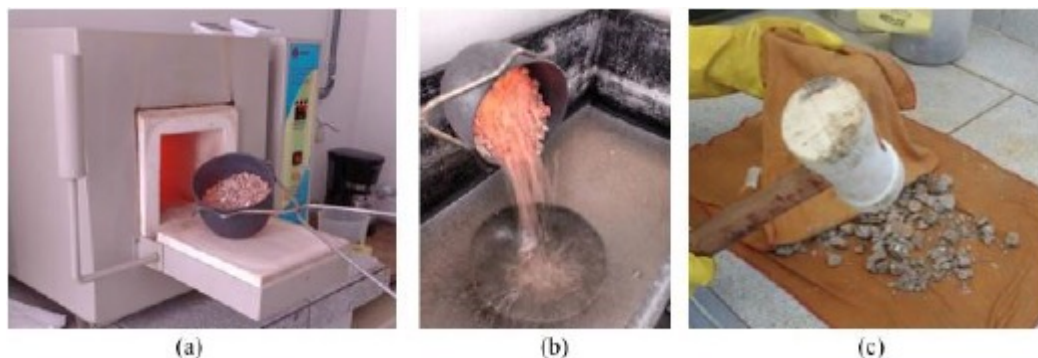
3.2.2. Ensaio de determinação de teor de argamassa aderida

A determinação do teor de argamassa aderida seguiu procedimentos já estudados por Ferreira (2007), Heineck (2012) e Sanchez (2004). Esses procedimentos foram aplicados à fração gráuda da pesquisa, pedrisco, brita e rachão. Esse parâmetro tem grande influência na absorção de água de cada agregado.

Segundo Ferreira (2007) não há norma que estabeleça procedimento experimental para o ensaio de determinação da quantidade de argamassa aderida nos grãos dos agregados reciclados, ou seja, determinação de teor de argamassa aderida. Entretanto, Ferreira (2007) em seu estudo seguiu um procedimento usualmente utilizado na Universidade Politécnica da Catalunha. Para o ensaio faz-se necessário a aplicação de um choque térmico nas partículas, provocando assim tensões internas nos agregados que geram desintegração e separação dos componentes.

Heineck (2012) utilizando desta técnica descreveu os procedimentos que também foram adotados neste trabalho: separou 1 kg de cada agregado reciclado (fração retida na peneira de abertura 4,8 mm); submeteu as amostras à secagem em estufa em temperatura em torno de 100°C, com uma margem de 5°C, até atingir massa constante; em seguida as amostras foram pesadas e colocadas em um forno mufla com temperatura pré-aquecida de 800°C, por aproximadamente 3 horas; imediatamente após a retirada da amostra do forno mufla o material foi derramado em um tanque com água fria sobre uma tela metálica; depois do resfriamento, o material foi removido da água e foi eliminado o excesso de água, para então colocar a amostra novamente na estufa a temperatura de 100°C ± 5°C por 24 horas; obtida a massa constante, a amostra foi envolta em um pano e com a ajuda de um martelo de borracha (tendo o cuidado para não quebrar os agregados), provocou-se a desintegração agregado/argamassa. Em seguida foi realizado o peneiramento do material de modo a eliminar o material passante na peneira de malha 4,8 mm e coletado a massa final da amostra (FIGURA 21).

FIGURA 21 - ENSAIO DE TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA: (A) AQUECIMENTO NO FORNO MUFLA. (B) IMERSÃO EM ÁGUA, APÓS AQUECIMENTO. (C) DESINTEGRAÇÃO AGREGADO/ARGAMASSA



FONTE: A autora (2015).

A segunda etapa de desintegração e separação da argamassa aderida foi realizada seguindo o método proposto por Sanchez (2004). O ensaio consiste na imersão da amostra que

ficou retida na peneira de malha 4,8 mm (do ensaio anterior), em uma solução de ácido clorídrico em temperatura ambiente, a desintegração e separação da argamassa aderida ao agregado reciclado de concreto (FIGURA 22) são induzidas pelo ácido clorídrico. De início as amostras foram submersas no ácido clorídrico por 72 horas, para ocorrer a dissociação do cimento e a dissolução da argamassa aderida aos grãos. Após o período de imersão, os agregados foram retirados da solução ácida e lavados. Após isto foram secos em estufa na temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas e então esfriados. Por fim, foi realizado o peneiramento dos agregados, eliminando as partículas passantes na peneira. Pesou-se a massa final dos agregados.

FIGURA 22 - SEGUNDA ETAPA DO ENSAIO DE TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA: IMERSÃO DO AGREGADO EM ÁCIDO



FONTE: A autora (2015).

3.2.3. Microscopia eletrônica de varredura

Para a análise do formato e textura dos grãos na fração miúda dos agregados optou-se pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em duas amostras de cada material (concreto e misto) respectivo a cada tipo de britador (mandíbula e impacto), sendo uma passante na peneira 0,3 mm e retida na peneira 0,15 mm. A FIGURA 23 apresenta as amostras preparadas para inserção no equipamento, lembrando que as amostras devem ser secas em estufa a 100°C por 24 horas.

FIGURA 23 - AMOSTRAS PARA MEV



FONTE: A autora (2015).

O equipamento usado foi o Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN VEGA3 LMU (FIGURA 24), com resolução de até 3 nm, analisa aspectos tridimensionais por estereoscopia de elétrons secundários. Mex foi o programa utilizado, da empresa Alicona.

FIGURA 24 - EQUIPAMENTO DE MEV



FONTE: A autora (2015).

Baseado na metodologia de Tristão (2005) realizou-se a análise da forma dos grãos dos agregados e então a imagem foi digitalizada para que fossem obtidos os parâmetros de forma e textura dos grãos dos agregados miúdos.

No ensaio o agregado utilizado foi o retido na peneira 0,15 mm a fim de preencher aproximadamente 200 grãos no amostrador padrão do ensaio MEV com aproximadamente 1 cm de diâmetro.

A análise das imagens dos grãos de areia foi realizada no *software* IMAGEJ. Este programa possibilita a medição de cada grão quanto ao seu maior e menor diâmetro, perímetro e área superficial. Com isso foi possível calcular o arredondamento, alongamento e esfericidade que cada grão.

O arredondamento foi calculado a partir da EQUAÇÃO 3 (TRISTÃO, 2005):

$$A_r = \frac{4S}{\pi(d_{\text{máx}})^2} \quad (3)$$

Onde:

A_r = arredondamento

S = área da projeção da partícula (mm^2)

$D_{\text{máx}}$ = diâmetro máximo de Feret (mm)

A esfericidade foi calculada a partir da EQUAÇÃO 4 (TRISTÃO, 2005):

$$F_f = \frac{4\pi S}{p^2} \quad (4)$$

Onde:

F_f = esfericidade

S = área de projeção da partícula (mm^2)

p = perímetro da projeção da partícula (mm)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS PARA USO EM BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS

A quantidade de material bruto foi 140 kg/amostra, dos quais duas porções de 35 kg foram utilizadas na caracterização inicial dos agregados. Parte dos 70 kg usados nessa caracterização inicial foi descartada devido à interferência de alguns ensaios nas propriedades dos agregados. A parcela não descartada foi reutilizada nos ensaios específicos de caracterização de

agregados para base e sub-base de pavimentos juntamente com os 70 kg restantes do total de resíduos coletado.

Vale salientar que os 140 kg totais de cada amostra não têm distribuição granulométrica semelhante em todas as oito amostras (RCD concreto britado no impacto e mandíbula, RCD misto britado no impacto e mandíbula, lotes A e B) e isso tornou-se um limitante dos ensaios da segunda fase de caracterização. Como foi adotada a norma DNIT 141 (2010) para uma composição de curva granulométrica, não podendo garantir as porcentagens de composição ideais de areia, pedrisco, brita e rachão em todas as amostras, impedindo a repetibilidade dos ensaios.

Os ensaios executados nessa segunda caracterização foram: resistência ao desgaste por abrasão Los Angeles; e Índice de Suporte Califórnia. Seguiram-se normas específicas para cada um dos ensaios já citados, ver TABELA 8.

TABELA 8 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS PARA USO EM BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS

CARACTERIZAÇÃO	NORMA
Abrasão Los Angeles	NBR NM 51 - 2001 DNER-ME 035/1998
Índice de Suporte Califórnia (CBR)	NBR 9895 - 1987 DNER-ME 049 /1994 NBR 12051 - 1991

FONTE: A autora (2015).

3.3.1. Abrasão Los Angeles

A limitação de material já referida submeteu a execução do ensaio de abrasão Los Angeles à apenas uma vez, sem a possibilidade de repetições. Também o ensaio só pode ser executado na fração brita. O total de material em massa ensaiado de cada amostra foi 5 kg, processado no equipamento de abrasão Los Angeles (FIGURA 25) com 500 rotações e com carga abrasiva de 12 bolas de ferro (diâmetro de aproximadamente 48 mm e massa compreendida entre 390 g e 445 g cada bola). Após as quinhentas rotações, as amostras foram peneiradas na peneira Nº 12 (1,7 mm) e o material retido na mesma foi pesado.

FIGURA 25 - EQUIPAMENTO DE ABRASÃO LOS ANGELES



FONTE: A autora (2015).

3.3.2. Índice de Suporte Califórnia

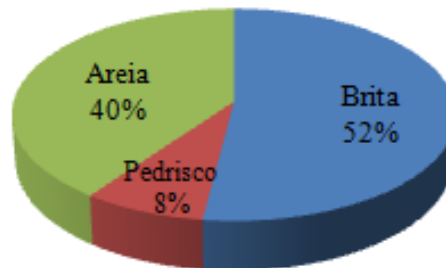
Para a realização do ensaio de Índice de Suporte Califórnia foi composta uma curva granulométrica proposta pela norma DNIT 141 (2010). A TABELA 9 indica as porcentagens médias de peso passante de cada faixa, e também a adaptação da autora para que essas porcentagens se encaixassem em cada fração determinada da pesquisa (areia, pedrisco, brita e rachão). As faixas A, B, C e D são aceitas para uso em rodovias cujo número de repetições (ou operações) dos eixos dos veículos, equivalentes às solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf durante o período considerado de vida útil do pavimento fosse: $> 5 \times 10^6$. A composição escolhida foi a Faixa A com bom grau de continuidade e com menor quantidade de fração areia, uma vez que existia escassez dessa fração em algumas amostras, a FIGURA 26 ilustra melhor a proporção de cada fração na composição granulométrica escolhida.

TABELA 9 - FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DNIT 141/2010

PENEIRAS		FAIXA A		FAIXA B		FAIXA C		FAIXA D	
(mm)	(Nº)	Peso passante (%)	Frações (%)	Peso passante (%)	Frações (%)	Peso passante (%)	Frações (%)	Peso passante (%)	Frações (%)
50,0	2"	100	-	100	-	-	-	-	-
37,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25,0	1"	-	-	83	-	100	-	100	-
19,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9,5	3/8"	48	52	58	42	68	32	80	19
6,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,8	4	40	8	45	13	50	18	68	13
2,4	10	25	40	33	45	38	50	55	68
-	40	14	-	23	-	23	-	35	-
-	200	5	-	10	-	10	-	18	-

FONTE: Adaptado de DNIT 141 (2010).

FIGURA 26 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA FAIXA A - DNIT 141/2010



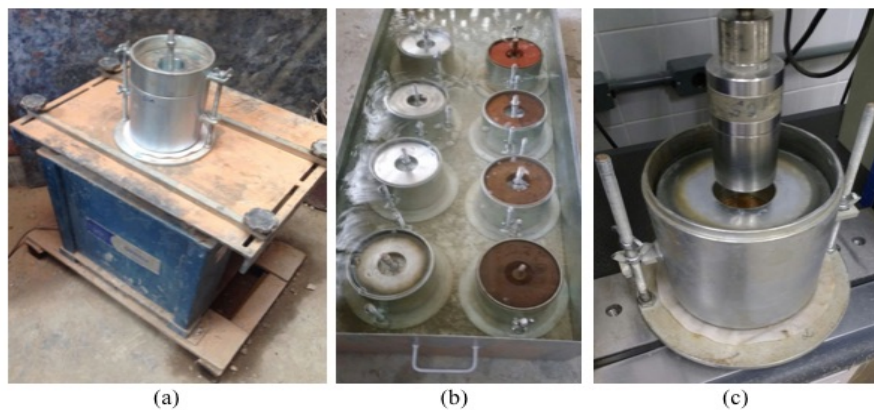
FONTE: A autora (2015).

No procedimento de moldagem dos corpos de prova para ensaio de ISC descrito na NBR 9895 (ABNT, 1987) usa-se a compactação, que quando usada em agregados reciclados causa quebras e descarte do material após o ensaio. Para contornar esse fator de descarte de material, possibilitando o reuso do mesmo em repetições do ensaio, adotou-se o método “A.1” de vibração de partículas descrito na NBR 12051 (ABNT, 1991). O método citado propicia o índice mínimo de vazios da amostra. A adoção de vibração das partículas viabilizou a reutilização do material após o ensaio, uma vez que a processo de vibração gera uma quebra dos grãos relativamente pequena, também o processo de vibração se mostra mais compatível para materiais arenoso. Dito posto, ao final de cada ensaio de ISC, corrigiu-se a granulometria das amostras antes que fosse feita uma nova repetição. A perda dos grãos quebrados pela vibração foi menor que a perda no processo de compactação e mais acessível de se recompor a curva granulométrica, usando uma pequena quantidade de material íntegro.

Outro ponto a relevar nesse ensaio é a respeito da umidade ótima. Como os corpos de prova foram moldados com o método de vibração e não de compactação, não se atingiu em nenhuma amostra o ponto de umidade ótima. Todos os corpos de provas foram moldados a seco, sem acréscimos de água.

A FIGURA 27 exemplifica os procedimentos do ensaio de Índice de Suporte Califórnia. Em primeiro momento a moldagem dos corpos de prova com o auxílio de uma mesa eletromagnética de vibração vertical, posteriormente a imersão por quatro dias em água juntamente com a leitura de expansão, e por último a etapa de penetração. O equipamento usado para a fase de penetração foi uma prensa EMIC, DL-10000, com carga máxima de 100 kN.

FIGURA 27 - ENSAIO DE ISC: (A) VIBRAÇÃO DA AMOSTRA. (B) IMERSÃO EM ÁGUA. (C) ETAPA DE PENETRAÇÃO



FONTE: A autora (2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo tem o propósito de apresentar os resultados obtidos em laboratório de caracterização dos agregados reciclados de concreto e misto processados no britador de mandíbula e no de impacto e também as discussões a respeito dos valores e dados coletados.

Cada propriedade foi explanada separadamente e quando necessário foi subdividida nas frações graúda e miúda, especificamente areia, pedrisco, brita e rachão.

4.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS

As propriedades gerais abordadas para a primeira etapa de caracterização foram as curvas granulométricas, forma dos grãos, teor de material passante na peneira de abertura 75 μm , massa unitária e massa específica, absorção de água e teor de argamassa aderida à superfície dos grãos. Os resultados da etapa de caracterização inicial foram apresentados na TABELA 10 englobando ensaios realizados na amostra completa e na fração graúda e na TABELA 11 envolvendo os ensaios executados separadamente na fração areia.

O estudo da composição granulométrica foi feito na amostra completa, ou seja, do jeito que a amostra veio da usina com todas as frações (areia, pedrisco, brita e rachão) juntas. Mediu-se também a quantidade de material $< 4,8$ mm em cada amostra e os coeficientes de curvatura, coeficiente de uniformidade e o módulo de finura.

Para a forma dos grãos, dividiram-se os resultados para a fração graúda e fração miúda. Na fração graúda, obteve-se o índice de forma e na fração miúda além do índice de forma, calcularam-se o arredondamento e esfericidades das partículas.

O teor de material menor que 75 μm foi determinado apenas na fração areia. Realizou-se a massa unitária na amostra completa. A massa específica foi aferida em cada fração (areia, pedrisco, brita e rachão).

TABELA 10 - RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO NA AMOSTRA COMPLETA E NA FRAÇÃO GRAÚDA DOS AGREGADOS RECICLADOS

Ensaio	Fração	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
Índice de forma	Graúda	2,1	2,1	2,3	2,6	2,1	2,3	2,3	2,2
Material < 4,8 mm (%)	Todas	28	13	53	39	29	11	59	29
Coefficiente de curvatura	Todas	6,5	2,2	0,3	1,2	2,9	2,1	0,3	4,0
Coefficiente de uniformidade	Todas	58,1	13,5	105,5	68,3	106,3	8,4	59,3	128,1
Módulo de finura	Todas	8,88	10,38	6,40	7,52	9,64	10,95	6,31	9,21
Massa unitária(g/cm³)	Graúda	1,42	1,35	1,35	1,22	1,50	1,29	1,44	1,25
Massa específica aparente (g/cm³)	Pedrisco	2,24	2,18	1,91	1,91	2,21	2,21	1,95	1,90
	Brita	2,33	2,26	1,97	2,09	2,28	2,26	2,11	1,90
	Rachão	2,25	2,19	1,99	2,07	2,17	2,21	1,99	1,84
Massa específica (g/cm³)	Pedrisco	2,71	2,61	2,57	2,57	2,58	2,57	2,55	2,45
	Brita	2,68	2,61	2,51	2,54	2,58	2,59	2,55	2,39
	Rachão	2,62	2,58	2,41	2,49	2,50	2,54	2,46	2,35
Absorção de água (%)	Pedrisco	8,5	7,7	12,5	13,3	6,5	6,7	12,3	12,2
	Brita	5,7	5,9	10,6	8,3	5,1	5,4	7,8	11,5
	Rachão	6,1	6,8	8,4	8,4	6,0	5,7	9,3	12,3
Teor de argamassa aderida (%)	Pedrisco	64	72	60	66	53	75	72	59
	Brita	69	61	56	51	52	67	49	53
	Rachão	43	71	68	68	61	65	62	65

FONTE: A autora (2015).

TABELA 11 - RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO NA FRAÇÃO AREIA DOS AGREGADOS RECICLADOS

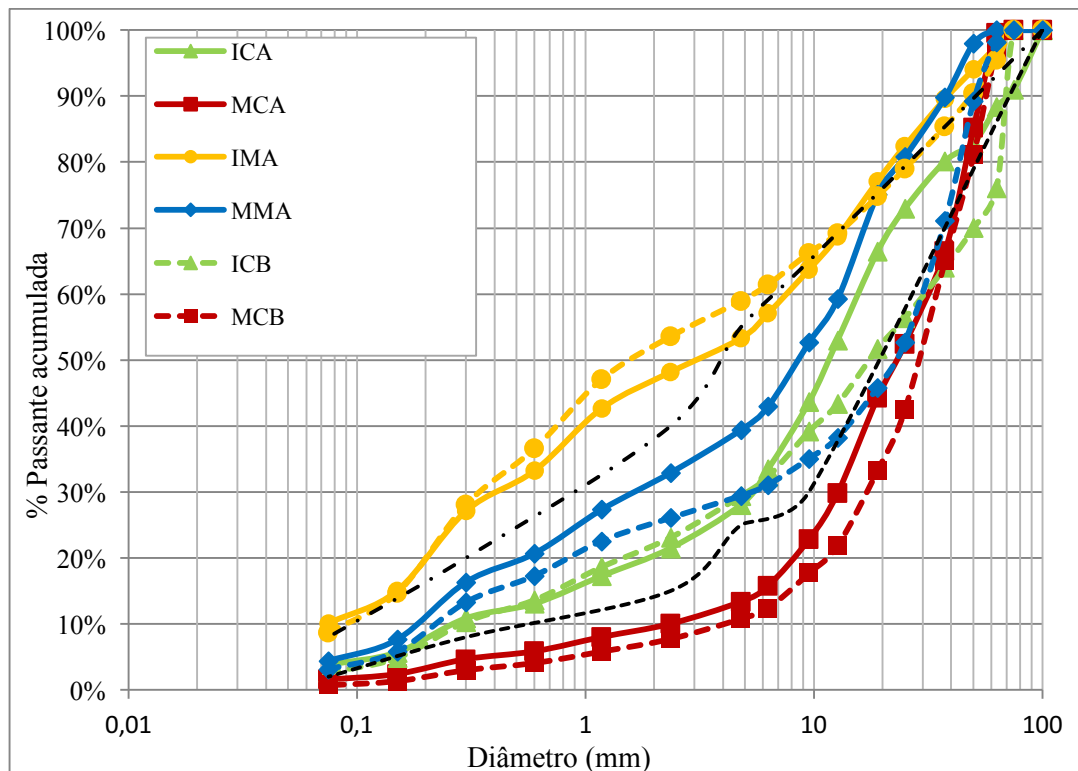
Ensaio	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB	
Índice de forma	1,7	1,7	1,5	1,6	1,6	1,7	1,5	1,6	
Arredondamento	0,51	0,51	0,57	0,54	0,52	0,46	0,48	0,51	
Esfericidade	0,40	0,44	0,46	0,40	0,30	0,26	0,20	0,37	
Teor de material < 75 µm (%)	14	11	21	13	9	9	15	11	
Massa específica aparente (g/cm³)	2,09	2,09	2,12	2,12	2,17	2,18	2,07	2,05	
Massa específica (g/cm³)	2,61	2,53	2,52	2,38	2,54	2,51	2,50	2,44	
Absorção de água (%)	Micro-ondas	15,9	12,4	14,3	13,0	13,4	11,6	18,3	15,7
	NBR NM 30 (Com finos <75 µm)	9,5	8,2	7,5	5,3	6,8	6,1	8,4	7,9
	NBR NM 30 (Sem finos <75 µm)	7,5	6,9	6,1	4,8	5,8	5,8	7,8	7,6

FONTE: A autora (2015).

4.1.1. Curvas granulométricas

A composição granulométrica das amostras, comparando-se britadores e a natureza dos RCD, possui diferenças entre si. A FIGURA 28 mostra a distribuição granulométrica passante acumulada dos agregados, da fração areia até a fração ração. Como extremos das curvas, têm-se as amostras mistas britadas no britador de impacto, tanto no lote A quanto no B, como as curvas mais finas e mais contínuas; e como curvas mais grossas e descontínuas, as duas amostras de concreto britadas na mandíbula.

FIGURA 28 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS

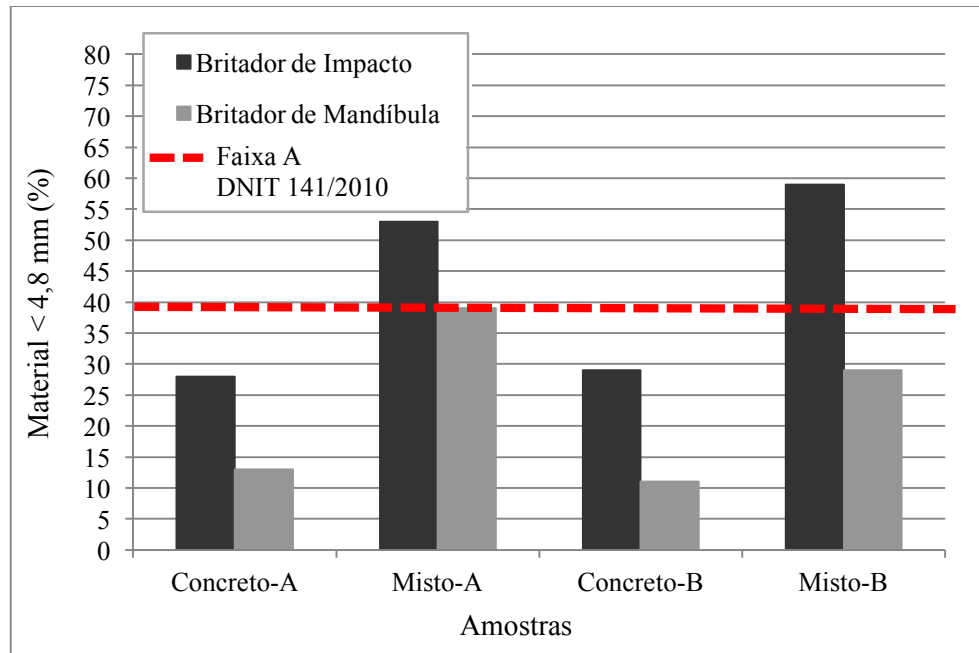


FONTE: A autora (2015).

As curvas granulométricas das amostras mistas no lote A e B britadas na mandíbula e as de concreto no impacto em ambos os lotes foram as curvas que de forma geral, melhor se encaixaram nos limites da composição granulométrica da Faixa A do DNIT 141 (2010). A Faixa A foi escolhida para fazer os ensaios de Índice de Suporte Califórnia.

É notável a diferença de porcentagem de material passante na peneira de abertura 4,8 mm, ou seja, diferença na capacidade produtora de fração areia de cada britador. O britador de impacto atingiu porcentagens sempre maiores que a britagem através da mandíbula, independente da origem dos resíduos (FIGURA 29).

FIGURA 29 - QUANTIDADE DE MATERIAL < 4,8 mm PRODUZIDA EM CADA BRITADOR



FONTE: A autora (2015).

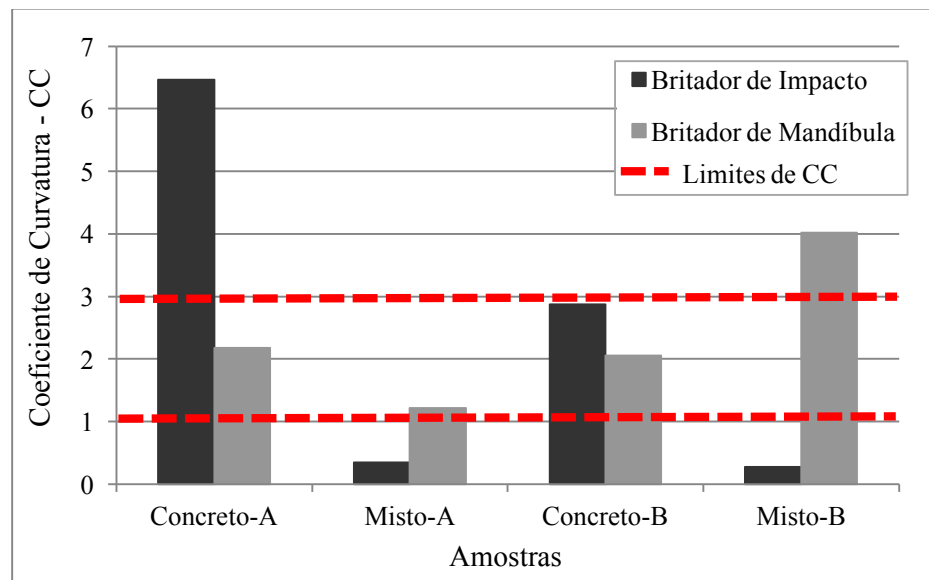
A respeito da natureza das amostras, a porcentagem maior de areia foi encontrada nos agregados mistos, independente do tipo de britador, ressaltando que materiais cerâmicos são mais frágeis que os materiais de concreto em frente ao processo de britagem. No lote A, os valores foram 53 e 39% para o agregado misto britado no impacto e mandíbula respectivamente, no lote B a variação entre os britadores foi de 59% no impacto e 29% na mandíbula.

A porcentagem de material com diâmetro abaixo de 4,8 mm (areia) tem sua importância na composição granulométrica média da Faixa A sugerida pela norma DNIT 141 (2010), que para esse material é de 40%. Também a NBR 15116 (ABNT, 2004b) define o teor de material < 0,42 mm mínimo e máximo iguais a 10 e 40%, respectivamente. Tais parâmetros são importantes para garantir valores de resistência e expansibilidade ideais para o pavimento.

No parâmetro coeficiente de curvatura (CC), Das (2012) cita uma faixa limite de 1 a 3 para classificar curvas granulométricas bem graduadas. De acordo com a FIGURA 30, a amostra A de concreto britada no impacto ficou acima do limite com 6,47 de CC e a mista do mesmo lote ficou abaixo com 0,34, ambas classificadas como mal graduadas. Ainda no lote A, para o britador de mandíbula as amostras de concreto e misto se encontraram entre os limites de CC, fato que também ocorreu no lote B nas amostras de concreto para os dois britadores. As amostras de material misto da amostragem B ficaram acima do limite para o impacto e para a mandíbula abaixo.

Os valores de CC obtidos nas oito amostras variaram bastante, dificultando indicar um comportamento linear dos britadores nesse parâmetro. Entretanto, mesmo com valores bem distintos entre as combinações e extrapolações dos limites de 1 a 3, notou-se que na amostra de concreto o britador de impacto gerou maior coeficiente de curvatura que a mandíbula e o inverso disso ocorreu na amostra mista.

FIGURA 30 - COEFICIENTE DE CURVATURA

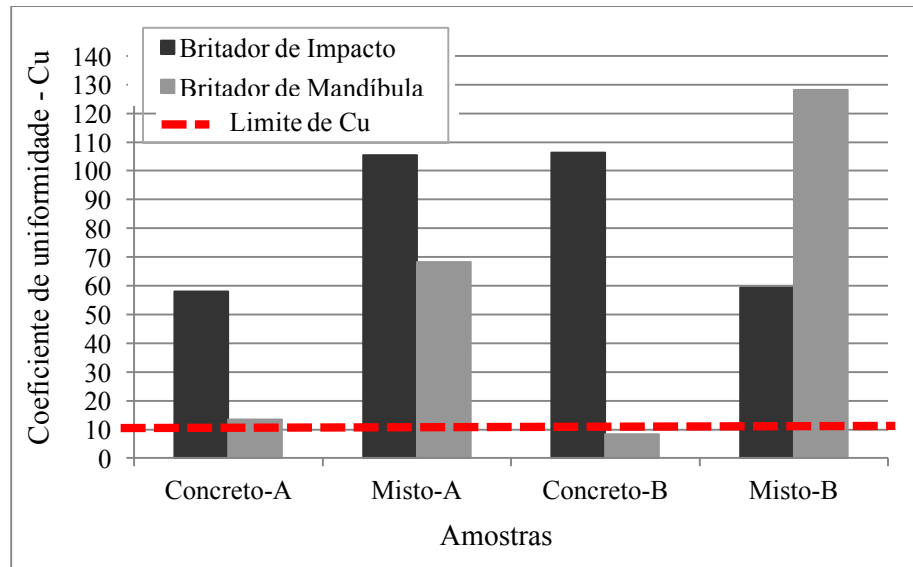


FONTE: A autora (2015).

Os coeficientes de uniformidade das curvas (C_u) acima de 10 são usados pela NBR 15116 (ABNT, 2004b) para classificá-las como curvas não uniformes e bem graduadas. Apenas a amostra de concreto do lote B britada na mandíbula (MCB) que ficou abaixo do valor estipulado pela norma. O britador de impacto em três das quatro amostras gerou maior C_u que a mandíbula,

só na amostra mista do lote B que a mandíbula superou o impacto no coeficiente de curvatura. Agregados mistos e de concreto tiveram comportamento para Cu diferente isso entre os lotes e até mesmo dentro do mesmo lote (amostragem B), inviabilizando assim ditar um padrão de valores de Cu em função da origem do RCD (FIGURA 31).

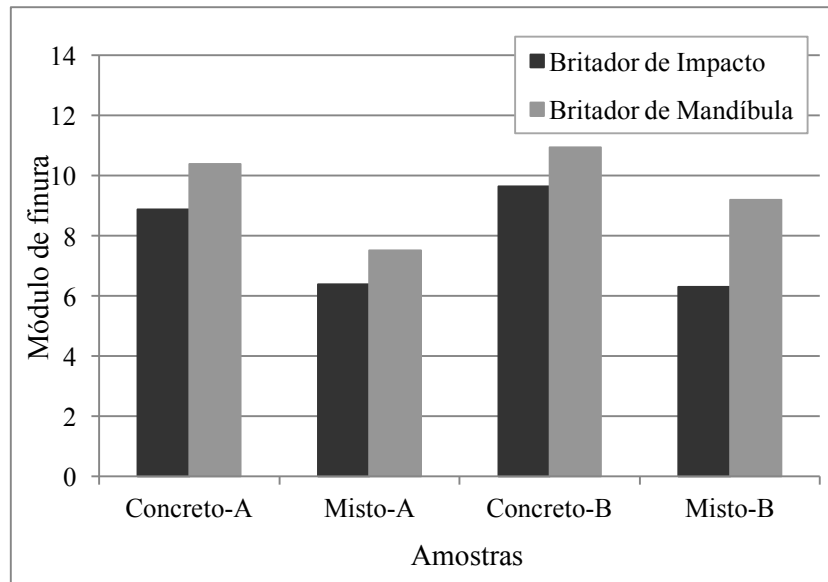
FIGURA 31- COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE



FONTE: A autora (2015).

Os britadores se diferenciaram quanto ao módulo de finura, o britador de impacto foi responsável por gerar material mais fino quando comparado ao de mandíbula, nos dois lotes e nos dois tipos de agregados (misto e concreto), conforme FIGURA 32. No material misto o módulo de finura foi maior que o de concreto nos dois lotes, mostrando que esse material é mais frágil. Esse parâmetro também é justificado pela quantidade de material $< 4,8$ mm que em todas as amostras no britador de impacto foi maior que no de mandíbula.

FIGURA 32 - MÓDULO DE FINURA

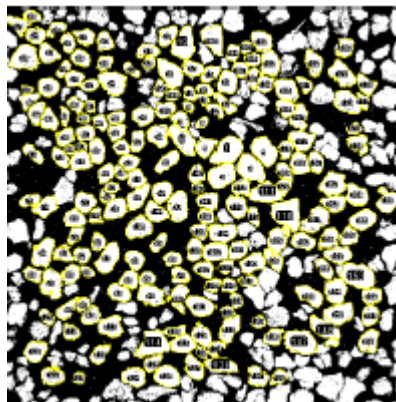


FONTE: A autora (2015).

4.1.2. Formas dos grãos

As imagens geradas no ensaio de MEV que possibilitaram a medição dos grãos do agregado miúdo para cálculos de índice de forma. A FIGURA 33 exemplifica uma das imagens, já trabalhadas para a obtenção dos 200 grãos.

FIGURA 33 - IMAGEM DE MEV NA ESCALA 2 mm DA AMOSTRA IMA

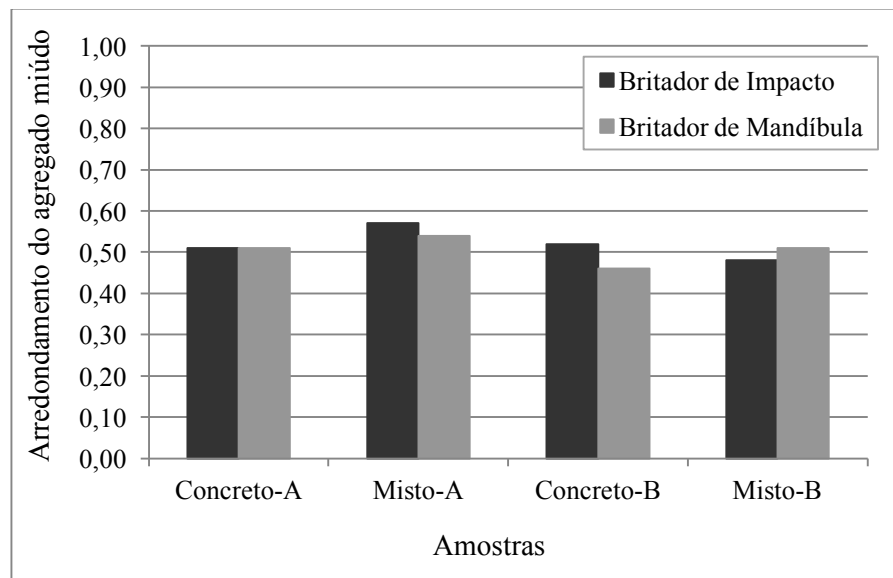


FONTE: A autora (2015).

Os dados completos de arredondamento, esfericidade e índice de forma de todas as amostras da fração miúda estão no APÊNDICE A. Os estudos estatísticos de verificação de diferença entre as amostras e também de associações de britadores (impacto e mandíbula) estão contidos no APÊNDICE B, como também os valores de média e variância das amostras.

No que se refere ao arredondamento para cada britador, estatisticamente três das quatro combinações de amostras tiveram diferenças significativas. No lote A o impacto ficou igual ou maior que a mandíbula, material concreto e misto respectivamente. Já no lote B, na amostra de concreto o impacto teve valor maior, e no misto valor menor, quando comparado à mandíbula (FIGURA 34). No arredondamento, quanto mais perto do valor 1 mais arredondado é o grão. Os valores de arredondamento entre os britadores, no lote A e no lote B não tiveram um comportamento constante, mesmo apresentando diferenças significativas pelos testes estatísticos, logo não se pode eleger um britador como o melhor na produção de grãos miúdos mais arredondados.

FIGURA 34 - ARREDONDAMENTO DO AGREGADO MIÚDO

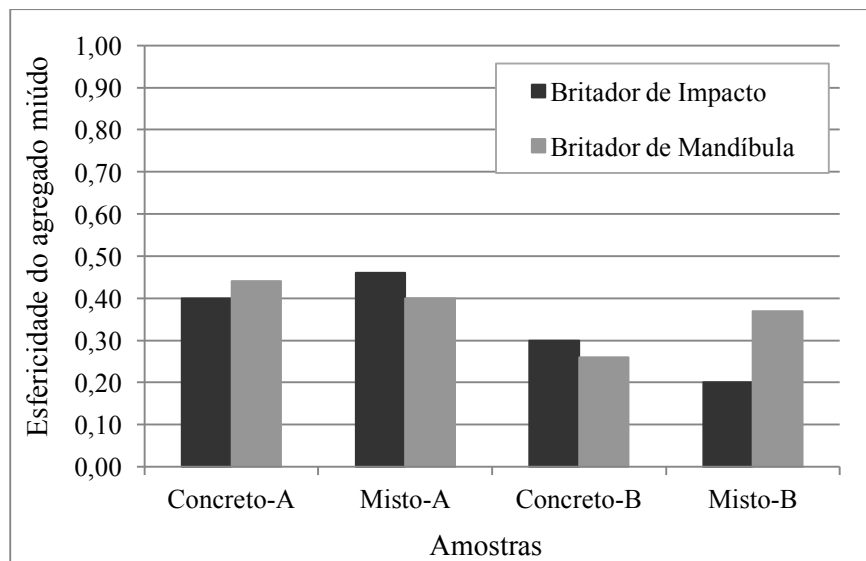


FONTE: A autora (2015).

Para a esfericidade, assim como no arredondamento, resultado mais perto do valor 1, mais esférico é o grão. Os estudos estatísticos entre amostras e entre britadores apontaram diferença significativas. Na FIGURA 35, o britador de impacto gerou a maior esfericidade de grãos (0,46), isso no material misto do lote A. Entretanto para o lote B, ainda com material misto,

a mandíbula teve maior esfericidade (0,37). Nas amostras de concreto, o comportamento dos britadores se inverteu, a mandíbula gerou mais esfericidade tanto no lote A quanto no B. Apesar do apontamento estatístico sobre as diferenças das amostras e britadores nesse parâmetro de análise, do mesmo modo que no arredondamento não se pode indicar um britador melhor, na esfericidade os britadores tiveram comportamentos opostos em cada lote e natureza de material. Assim, não foi possível afirmar qual dos britadores produz grãos mais esféricos.

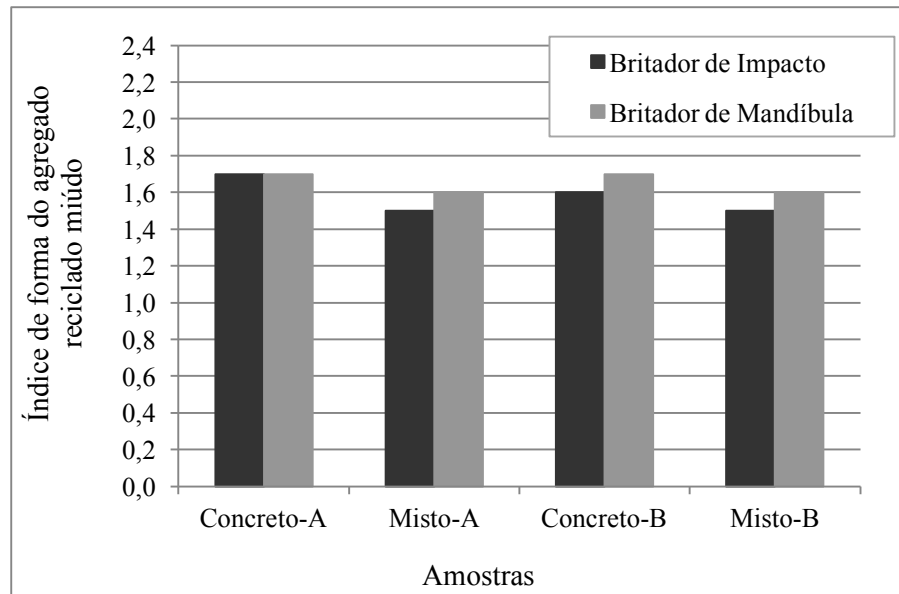
FIGURA 35 - ESFERICIDADE DO AGREGADO MIÚDO



FONTE: A autora (2015).

Estatisticamente através do teste ANOVA e Test-t, o índice de forma dos agregados miúdos não se diferenciou entre os britadores na amostra A, e na B o britador de mandíbula foi maior que o de impacto (FIGURA 36). Entretanto a proximidade dos valores de índice de forma do agregado miúdo entre os britadores fez com que os dados não fossem suficientes para concluir que houve diferenças entre os mecanismos de britagem em relação à forma dos grãos.

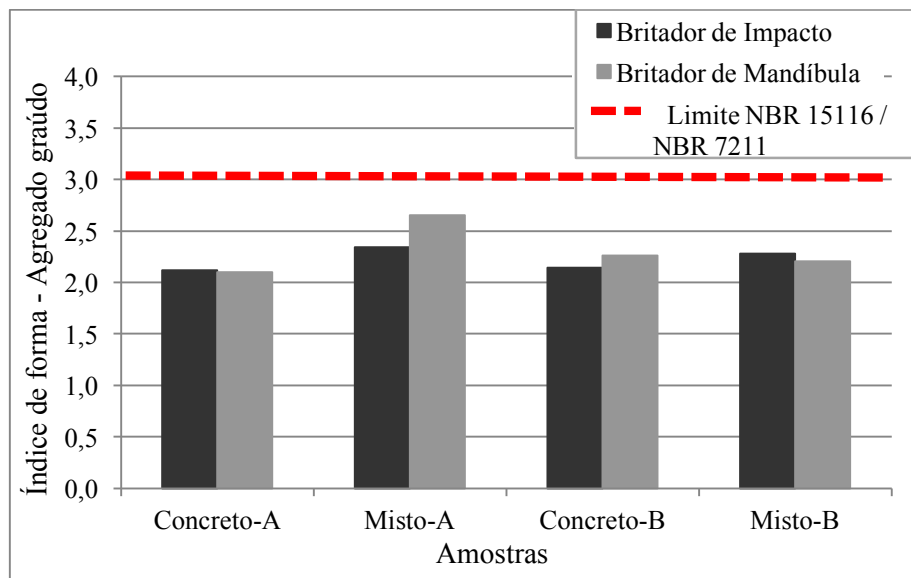
FIGURA 36 - ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO



FONTE: A autora (2015).

Analisando o índice de forma dos agregados graúdos na FIGURA 37, na amostragem B, todos os resultados foram considerados iguais estatisticamente, sem variação significativa, conseqüentemente não houve diferença entre os britadores.

FIGURA 37 - ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS GRAÚDOS



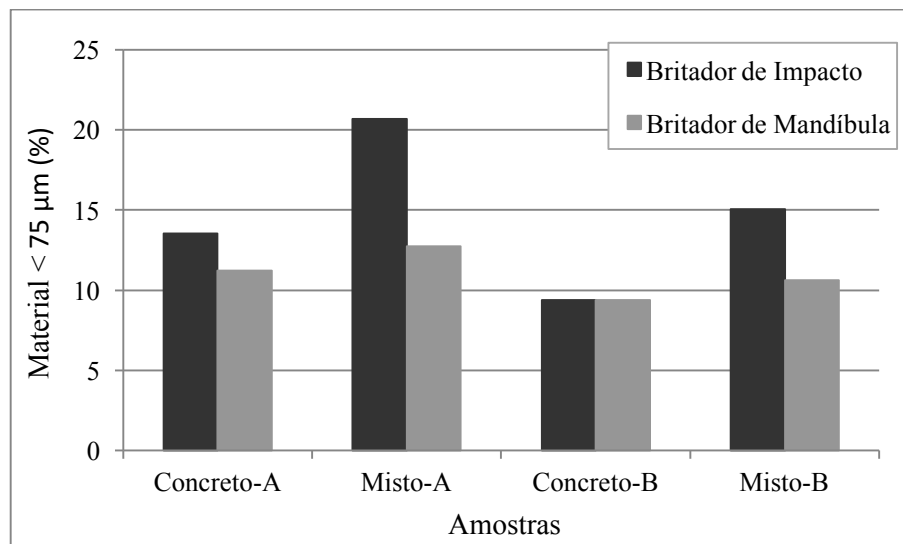
FONTE: A autora (2015).

Na amostra A, a igualdade também se deu no material de concreto, havendo diferença entre os britadores apenas no material misto, com índice de forma 2,6 na mandíbula, maior que 2,3 no impacto, ou seja, a mandíbula no material misto gerou grãos mais lamelares que o impacto. Conferem-se os cálculos estatísticos deste parâmetro no APÊNDICE C. De modo geral, todas as oito amostras de agregados satisfizeram o índice de forma < 3 estabelecido pela NBR 15116 (ABNT, 2004b). Em três das quatro combinações, para índice de forma dos agregados graúdos, os britadores não se diferenciaram. Na amostra que houve diferença (misto do lote A) os índices ficaram próximos, não sendo o bastante para classificar um dos britadores como o produtor de grãos mais lamelares ou mais cúbicos.

4.1.3. Material passante na peneira de abertura 75 μm

Na FIGURA 38 é possível perceber que o britador de impacto no lote A produziu um teor de material passante na peneira 75 μm maior que as amostras cominuidas no britador de mandíbula. Na amostra mista do primeiro lote, a diferença entre os britadores foi 8% a mais para os agregados gerados no britador de impacto. Já na amostra de concreto, essa diferença foi um pouco menor, 3%.

FIGURA 38 - MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA DE ABERTURA 75 μm



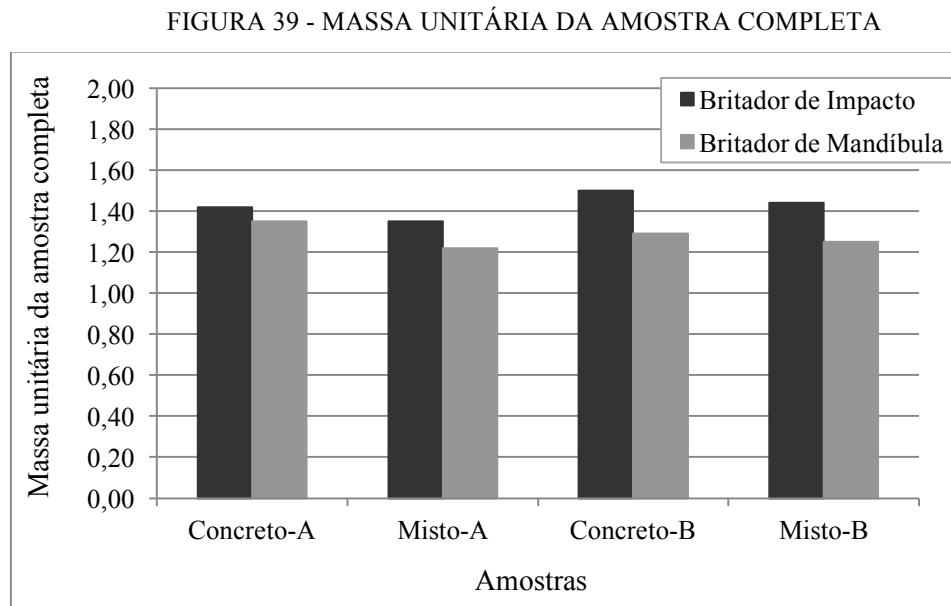
FONTE: A autora (2015).

No lote B, a amostra mista também teve valor maior para material passante na peneira 75 μm no britador de impacto que a amostra britada na mandíbula. Nos agregados reciclados de concreto, não houve diferença entre os britadores nesse parâmetro de análise, ambos atingiram 9% para o teor de materiais < 75 μm .

É notável a diferença entre os teores de material < 75 μm devida à natureza das amostras. Nos materiais de origem mista esse teor, de forma geral, tendeu a ser maior que os de concreto, independente do equipamento de britagem. Com a amostragem estudada, percebeu-se que o britador de impacto gerou mais material fino que a mandíbula. Os estudos estatísticos sobre a porcentagem de material passante na peneira 75 μm podem ser confirmados no APÊNDICE D.

4.1.4. Massas unitárias e massas específicas das amostras

Notou-se que a natureza do material influenciou a massa unitária das amostras, conforme FIGURA 39 e APÊNDICE E (análise estatística).



FONTE: A autora (2015).

As amostras oriundas de resíduos de concreto possuíram massa unitária maior que as amostras de origem mista, nos dois tipos de britagem, causada principalmente pela menor porosidade do agregado. Tratando-se em específico da comparação entre os britadores, em todas

as amostras, tanto no lote A quanto no B, os maiores valores para massa unitária são encontrados nas amostras britadas no britador de impacto. Isso se deve ao fato que o britador de impacto também é o responsável por uma produção maior de areia em comparação com a mandíbula, e que, para esse ensaio, a quantidade maior de areia contribuiu para redução do índice de vazios.

Calcularam-se as massas específicas e massas específicas aparentes de cada fração de agregado reciclado (APÊNDICE F). Os valores de massa específica aparente que foram usados para fazer correlações com outros parâmetros de análise dos agregados reciclados.

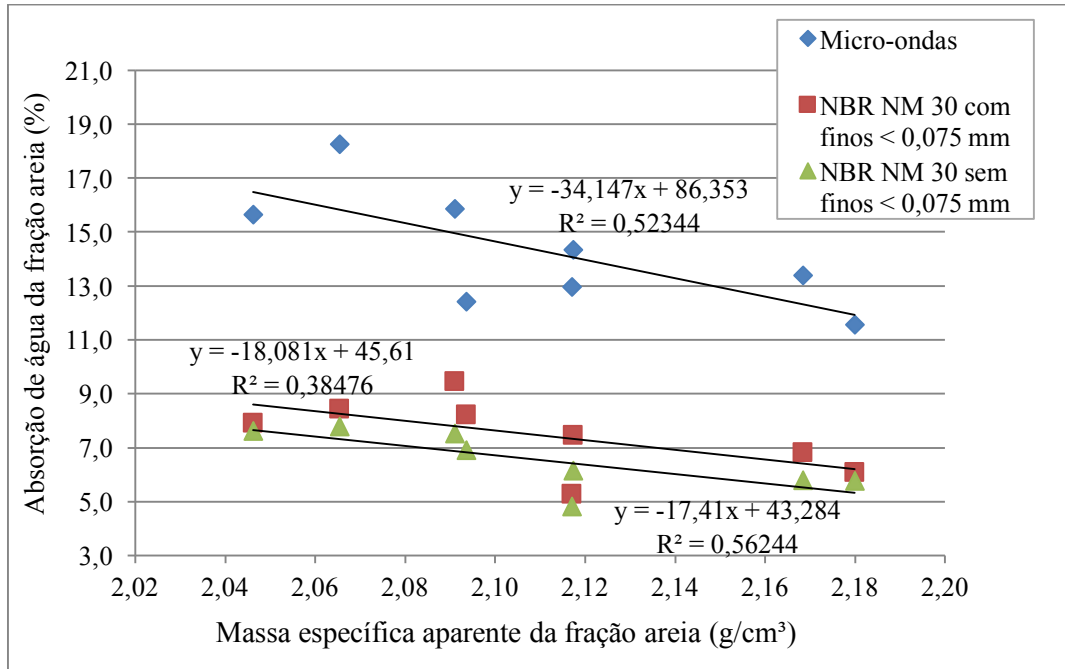
O processo de britagem a priori não teria influência sobre os valores de massas específicas dos agregados, já que esse parâmetro está ligado à origem do material. E de fato, os resultados encontrados para massa específica e massa específica aparente foram bem semelhantes entre os britadores, sem diferenças consideráveis.

4.1.5. Absorção de água das amostras

Como já citado na metodologia, a absorção de água dos agregados miúdos foi obtida de três maneiras diferentes: método do micro-ondas; método da NBR NM 30 (ABNT, 2001a) com material $< 75 \mu\text{m}$; e por último novamente o método da norma, mas sem material $< 75 \mu\text{m}$. A execução dos três métodos serviu como uma aferição dos resultados, correlacionando-os com a massa específica aparente da areia. Como pode ser visto na FIGURA 40, todas as formas de medição de absorção de água tenderam a ser menor, quanto maior era a massa específica aparente.

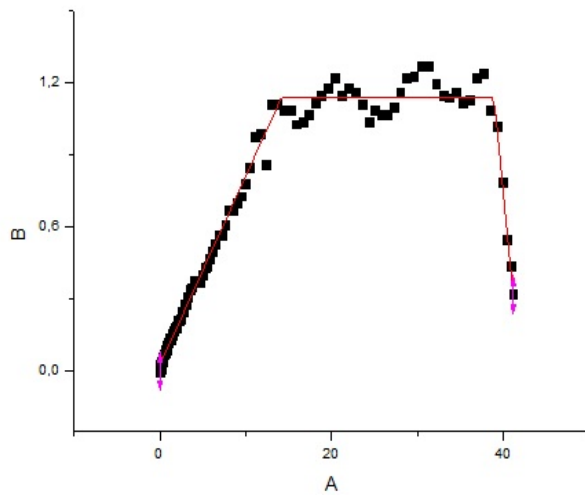
Todas as amostras apresentaram maior absorção no ensaio que utilizou o forno micro-ondas quando comparadas às amostras nos outros métodos. Isso se deve à forma de saturação a vácuo usada nesse método que se mostrou mais eficiente que a especificada pela NBR NM 30 (ABNT, 2001a), a qual satura a amostra pela simples imersão em água por 24 horas. A FIGURA 41 e a FIGURA 42 mostram dois exemplos (amostra mista no impacto e amostra mista na mandíbula, ambas do lote A) da obtenção de resultados de absorção de água na fração areia no método micro-ondas, através do programa Origin. Tanto para as amostras mistas, quanto para as de concreto e também, nos dois lotes, o britador de impacto gerou maiores valores de absorção que o britador de mandíbula (ver médias no APÊNDICE G).

FIGURA 40 - RELAÇÃO ABSORÇÃO DE ÁGUA x MASSA ESPECÍFICA APARENTE: FRAÇÃO AREIA



FONTE: A autora (2015).

FIGURA 41 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA AMOSTRA IMA NO PROGRAMA ORIGIN: MÉTODO MICRO-ONDAS



Equation

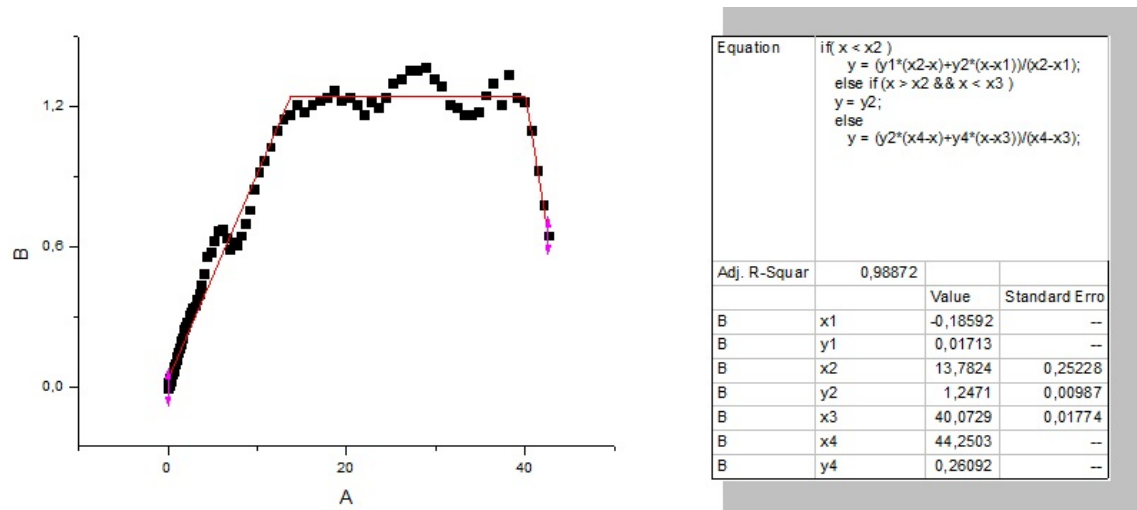
```

if( x < x2 )
    y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);
else if( x > x2 && x < x3 )
    y = y2;
else
    y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);
    
```

Adj. R-Squar	0,99153		
		Value	Standard Erro
B	x1	-0,15721	--
B	y1	0,01439	--
B	x2	14,1906	0,09615
B	y2	1,1425	0,00751
B	x3	38,9030	0,1101
B	x4	41,5286	8,06336E 6
B	y4	0,16575	2,77982E 6

FONTE: A autora (2015).

FIGURA 42 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA AMOSTRA MMA NO PROGRAMA ORIGIN: MÉTODO MICRO-ONDAS



FONTE: A autora (2015).

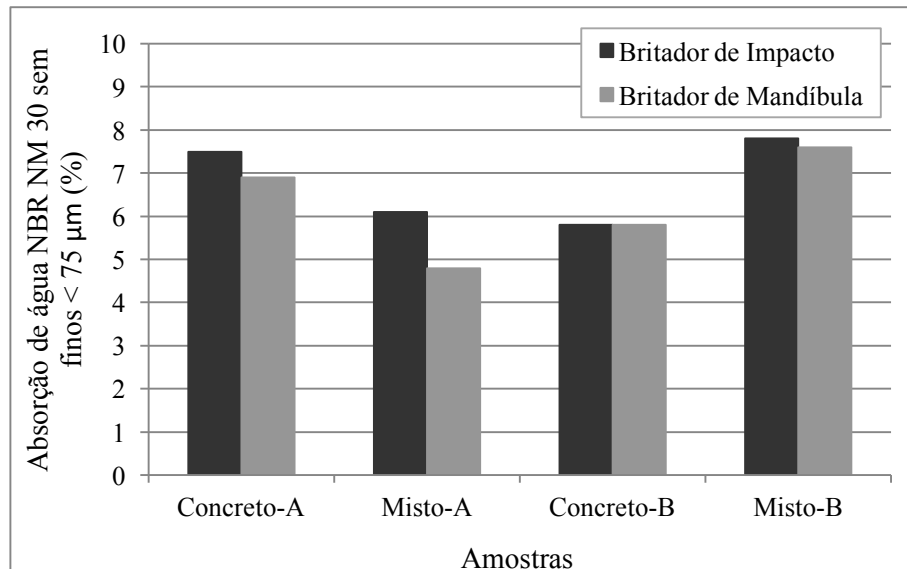
O ensaio de absorção pela NBR NM 30 (ABNT, 2001a) com finos < 75 μm forneceu uma absorção maior que a sem esses finos. O que era esperado já que, o material menor que 75 μm possui uma maior superfície específica, absorvendo assim mais água. Como no ensaio de micro-ondas, nas amostras britadas no britador de impacto tiveram absorção maior que no de mandíbula (ver médias no APÊNDICE G). No lote A, a maior absorção foi na amostra ICA de 9,5% e no lote B a amostra IMB com 8,4%.

A análise estatística do parâmetro absorção de água na fração miúda foi realizada apenas no método NBR NM 30 (ABNT, 2001a) sem material passante na peneira de abertura 75 μm (FIGURA 43). Os resultados de absorção nesse método que foram usados nas correlações com outras propriedades.

Julgou-se inicialmente que material fino influenciaria a moldagem do tronco de cone para determinação da absorção, devido à coesão entre os grãos, mas ao final esse método deu menor absorção que o método que usou os finos.

Estatisticamente não houve diferença dos britadores na absorção entre as amostras ensaiadas com o método NBR NM 30 (ABNT, 2001a) sem finos < 75 μm (APÊNDICE H). Todavia, com relação à natureza das amostras, elas se comportaram diferentemente em cada lote, no A as amostras mistas tiveram menor absorção que as de concreto, já na amostragem B as de concreto que tiveram menor absorção.

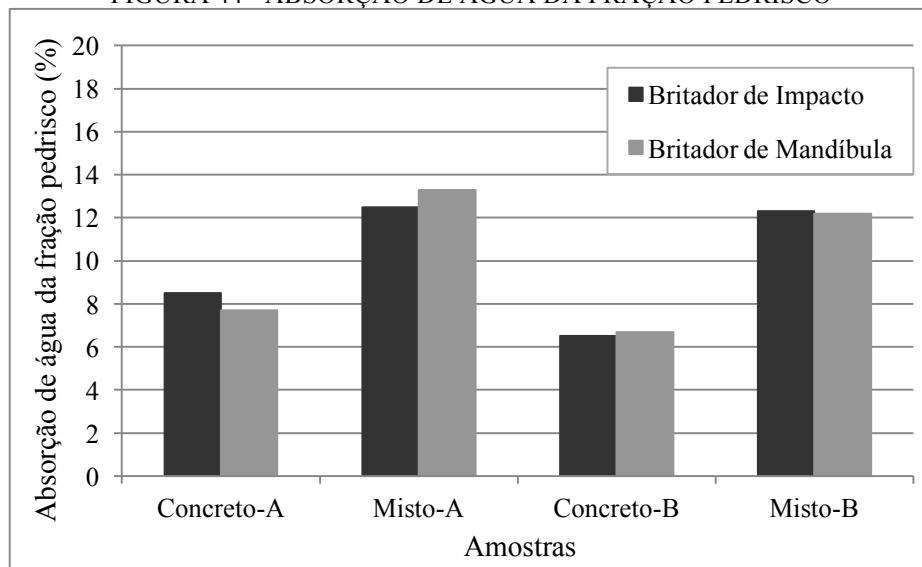
FIGURA 43 - ABSORÇÃO DE ÁGUA NBR NM 30 SEM FINOS < 75µm



FONTE: A autora (2015).

A absorção na fração graúda foi dividida em pedrisco, brita e rachão. Nos agregados que compõem a fração pedrisco não houve diferenças nas absorções em relação ao tipo de britagem (APÊNDICE I), mas sim em relação à natureza dos agregados. Agregados de origem mista no lote A, em média possuíram uma absorção em torno de 37% maior que os agregados de concreto, e no lote B esse valor foi de 46%, FIGURA 44.

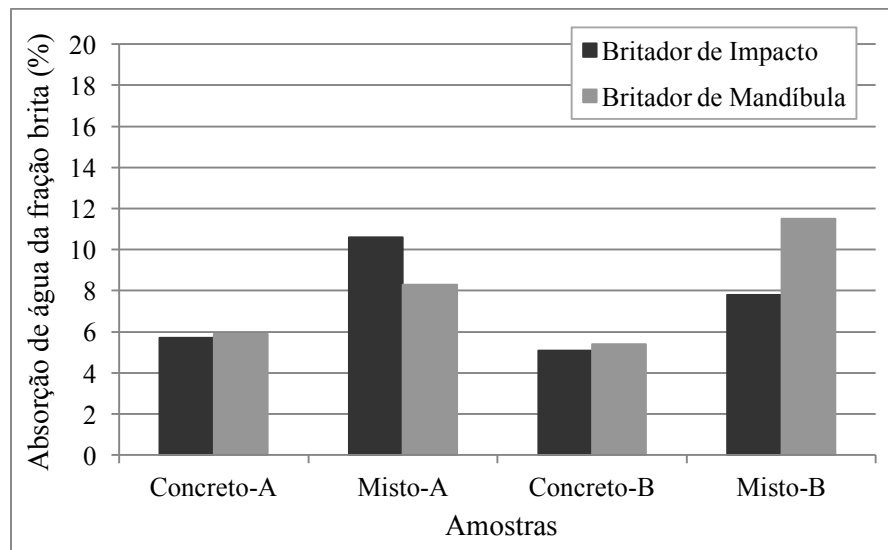
FIGURA 44 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA FRAÇÃO PEDRISCO



FONTE: A autora (2015).

Na fração brita, a absorção de água teve diferença em relação aos britadores nas amostras mistas, e à origem do material, sendo que os agregados mistos absorvem mais água que os de concreto (APÊNDICE J). O percentual médio de diferença entre a absorção no agregado de concreto e o agregado de misto foi semelhante ao encontrado na fração pedrisco, sendo o valor maior no misto em torno de 39% no lote A e 46% no lote B. A FIGURA 45 revela que a desigualdade entre impacto e mandíbula nos agregados mistos se inverteu em relação aos lotes, no primeiro lote o maior valor de absorção foi no impacto com 10,6% contra 8,3% na mandíbula, já no lote B foi 7,8% no impacto versus 11,5% na mandíbula.

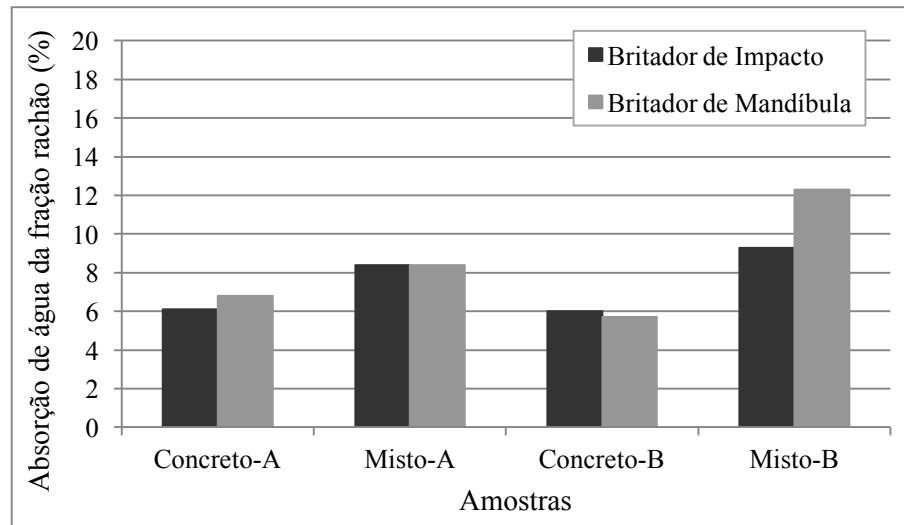
FIGURA 45 - ABSORÇÃO DE ÁGUA NA FRAÇÃO BRITA



FONTE: A autora (2015).

Estatisticamente, a fração rachão para valores de absorção de água não apresentou diferenças significativas entre os britadores (FIGURA 46). Como já era de se esperar, houve diferença entre a origem dos agregados (APÊNDICE K), seguindo o mesmo comportamento ocorrido na fração pedrisco e brita, no qual o material misto atingiu valores maiores de absorção que o de concreto.

FIGURA 46 - ABSORÇÃO DE ÁGUA NA FRAÇÃO RACHÃO



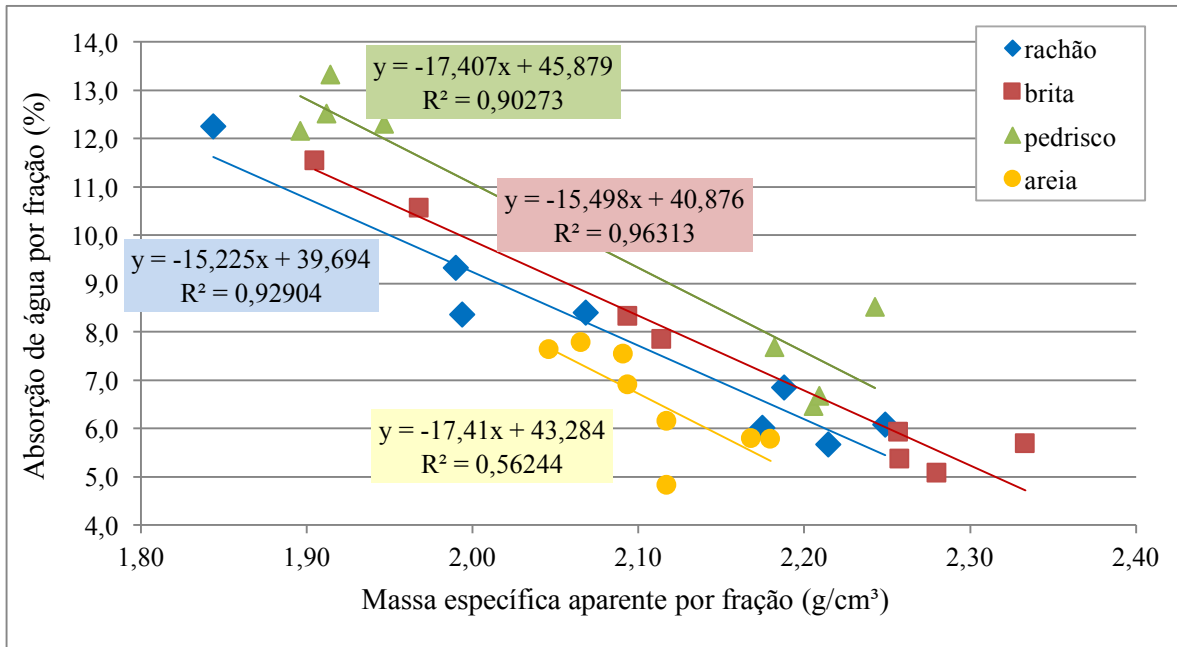
FONTE: A autora (2015).

Analisando todas as frações (areia, pedrisco, brita e rachão) juntas, as amostras de concreto tiveram valores crescentes de absorção de água para a seguinte ordem das frações: brita, rachão, pedrisco e areia; sendo que a fração areia só não foi maior na amostra MCB. E para os agregados mistos a fração areia foi a que teve menor absorção em três (IMA, MMA e MMB) das quatro amostras, só na amostra IMB que a areia não foi a menor absorção entre as frações.

Substancialmente, no quesito absorção de água dos agregados reciclados, teve-se mais influência da natureza do material do que o tipo de equipamento de britagem usado na produção de RCD.

Como uma análise mais apurada da propriedade de absorção de água dos agregados reciclados, correlacionou-se essa propriedade com a massa específica aparente de cada fração. Em todas as frações, os maiores valores de absorção foram encontrados em agregados com a menor massa específica aparente (FIGURA 47).

FIGURA 47 - CORRELAÇÃO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA COM MASSA ESPECÍFICA APARENTE POR FRAÇÃO

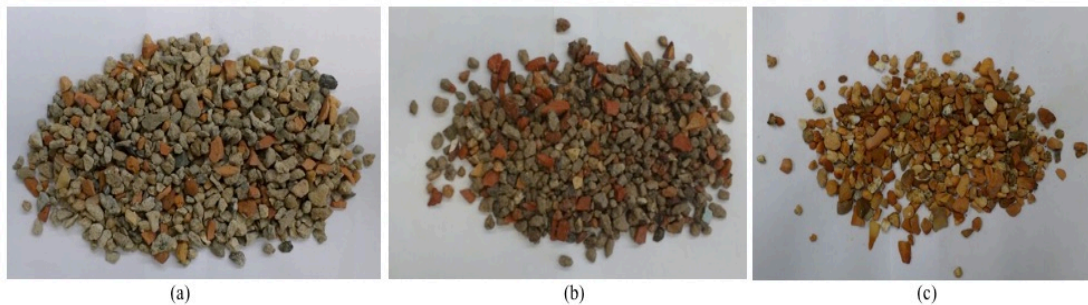


FONTE: A autora (2015).

4.1.6. Teor de argamassa aderida das amostras

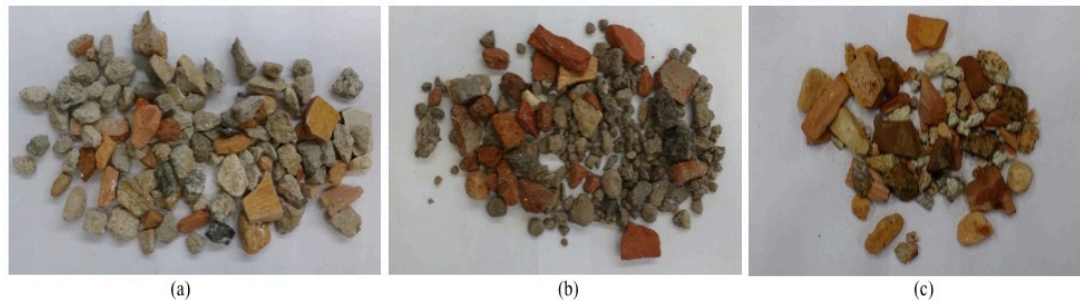
Aplicando a metodologia de determinação de teor de argamassa aderida aos grãos graúdos de agregados reciclados foi possível ver a proporção desse item na composição do RCD misto e de concreto estudados. A FIGURA 48, FIGURA 49 e FIGURA 50 ilustram a perda da argamassa aderida nas frações pedrisco, brita e rachão respectivamente (amostra MMA), ao longo do ensaio. Primeiro a submissão dos agregados no forno mufla, imersão imediata em água depois do forno e por último o banho químico em ácido clorídrico para a remoção completa da argamassa aderida. Os dados completos sobre o teor de argamassa aderida estão no APÊNDICE L.

FIGURA 48 - PERDA DE ARGAMASSA ADERIDA NO PEDRISCO MMA: (A) AGREGADO INICIAL. (B) AGREGADO APÓS IMERSÃO NA ÁGUA. (C) AGREGADO APÓS BANHO QUÍMICO



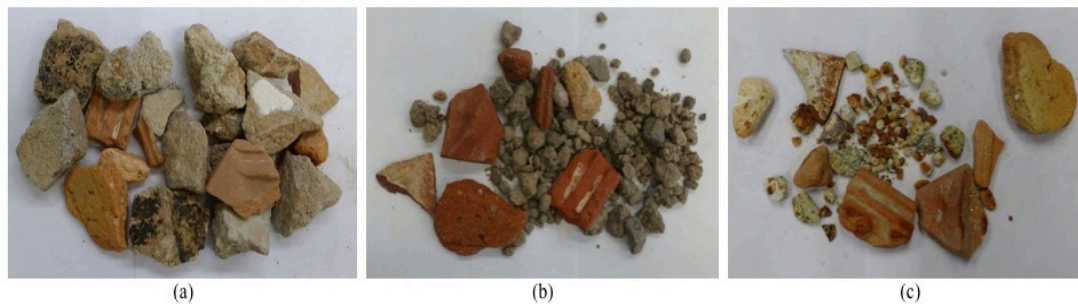
FONTE: A autora (2015).

FIGURA 49 - PERDA DE ARGAMASSA ADERIDA NA BRITA MMA: (A) AGREGADO INICIAL. (B) AGREGADO APÓS IMERSÃO NA ÁGUA. (C) AGREGADO APÓS BANHO QUÍMICO



FONTE: A autora (2015).

FIGURA 50 - PERDA DE ARGAMASSA ADERIDA NO RACHÃO MMA: (A) AGREGADO INICIAL. (B) AGREGADO APÓS IMERSÃO NA ÁGUA. (C) AGREGADO APÓS BANHO QUÍMICO

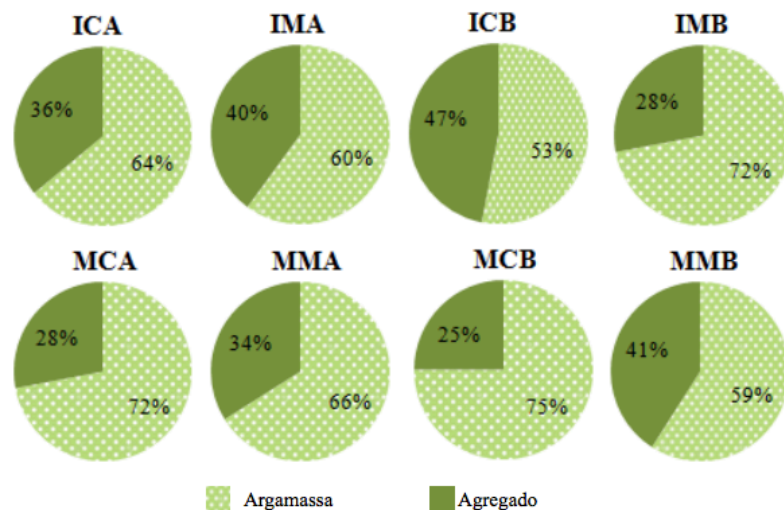


FONTE: A autora (2015).

Ao examinar a fração pedrisco, no lote A tanto o ARC quanto o ARM, o britador de impacto foi mais eficiente na retirada de argamassa aderida à superfície dos grãos, e no lote B o mesmo aconteceu na amostra de concreto. Isso é visto em função dos valores mais baixos de teor

de argamassa indicados na FIGURA 51 para as amostras de impacto, exceto na amostra mista do lote B. Os valores mais baixos podem ser consequência dos mecanismos de britagem, o britador de impacto em seu processo de cominuição foi capaz de desprender uma porcentagem maior de argamassa aderida que o movimento de pressagem da mandíbula. O desprendimento de argamassa ocorreu no momento da britagem, restando assim uma quantidade menor para ser desagregada no ensaio de determinação de teor de argamassa aderida. O material misto teve a tendência de ter menor valor de argamassa aderida que o material de concreto nas amostras do lote A em ambos os britadores, e na amostra B no britador de mandíbula.

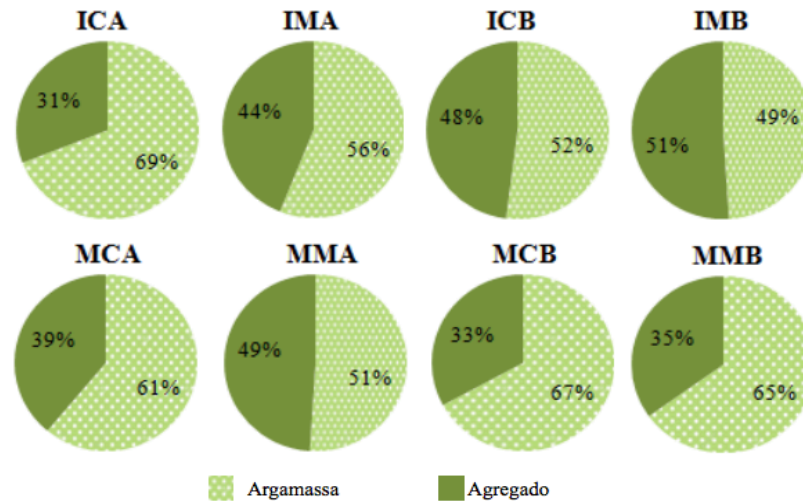
FIGURA 51 - TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA NA FRAÇÃO PEDRISCO



FONTE: A autora (2015).

O comportamento do desprendimento da argamassa aderida na fração brita foi um pouco diferente que o da fração pedrisco. No lote A, o britador que se mostrou mais eficiente na retirada de argamassa dos agregados foi o de mandíbula, apresentando assim resultados menores que o de impacto no ensaio de determinação do teor de argamassa aderida (FIGURA 52). E na amostragem B, o comportamento se assemelhou ao da fração pedrisco, tendo o britador de impacto como mais eficiente. As amostras do lote A como as do B, quando britados em um mesmo britador, o ARM apresentou menor valor de argamassa aderida que o ARC.

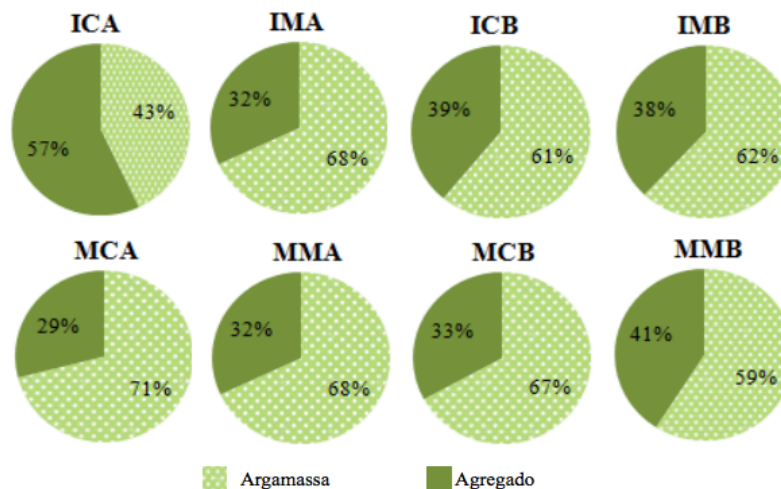
FIGURA 52 - TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA NA FRAÇÃO BRITA



FONTE: A autora (2015).

Com valores bem aproximados nas amostras de concreto e mista do lote B, a fração rachão assemelhou-se ao pedrisco no comportamento dos resultados de teor de argamassa aderida, pois o britador de mandíbula retirou menos argamassa dos grãos de RCD que o de impacto (FIGURA 53). No lote A, as amostras mistas não se diferenciaram em função do britador e as de concreto, o impacto em seu processo de britagem foi capaz de retirar cerca de 28% a mais de argamassa aderida ao grão que a mandíbula. Em função da natureza dos agregados reciclados, não houve um comportamento homogêneo nas amostras.

FIGURA 53 - TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA NA FRAÇÃO RACHÃO



FONTE: A autora (2015).

A porcentagem de argamassa aderida ao agregado reciclado pode apresentar dependência da origem do material, porque os materiais mistos tenderam a ter menos argamassa aderida que os materiais de concreto, até porque a sua concepção é ser uma mistura de agregados cerâmicos com os de concreto. Pode-se ter um RCD misto com uma proporção maior de cerâmica pura que fragmentos de concreto e no final isso interferiria na porcentagem de argamassa total do agregado, mascarando assim os resultados do ensaio no momento abordado. E em termos de equipamento de britagem, na maioria das amostras estudadas e nas diferentes frações graúdas, o britador de impacto consegue cominuir o RCD de tal forma que ele retira mais argamassa aderida aos grãos. E devido a essa retirada maior na fração graúda, o teor de argamassa na fração miúda foi maior que a do britador de mandíbula.

4.2 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS PARA USO EM BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS

Outras duas propriedades, abrasão Los Angeles e Índice de Suporte Califórnia foram analisadas como parâmetros de caracterização de agregados reciclados para o uso em base e sub-base de pavimentos. Na TABELA 12 foram expressos os resultados dessa fase da pesquisa.

Para correlação com resultados do ensaio de ISC calculou-se a massa unitária (vibrada seca) e absorção segundo as proporções das frações usadas na faixa granulométrica do DNIT.

TABELA 12 - RESULTADOS GERAIS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS PARA USO EM BASE E SUB-BASE

Parâmetro		ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
Los Angeles - Brita (%)		62	47	62	68	45	55	57	74
Faixa A DNIT	Massa unitária vibrada seca (g/cm ³)	1,87	1,86	1,74	1,69	1,91	1,80	1,80	1,87
	Absorção de água (%)	6,64	6,45	8,94	7,30	5,47	5,63	8,16	10,03
	Índice de Suporte Califórnia (%)	19	46	31	34	40	52	24	23

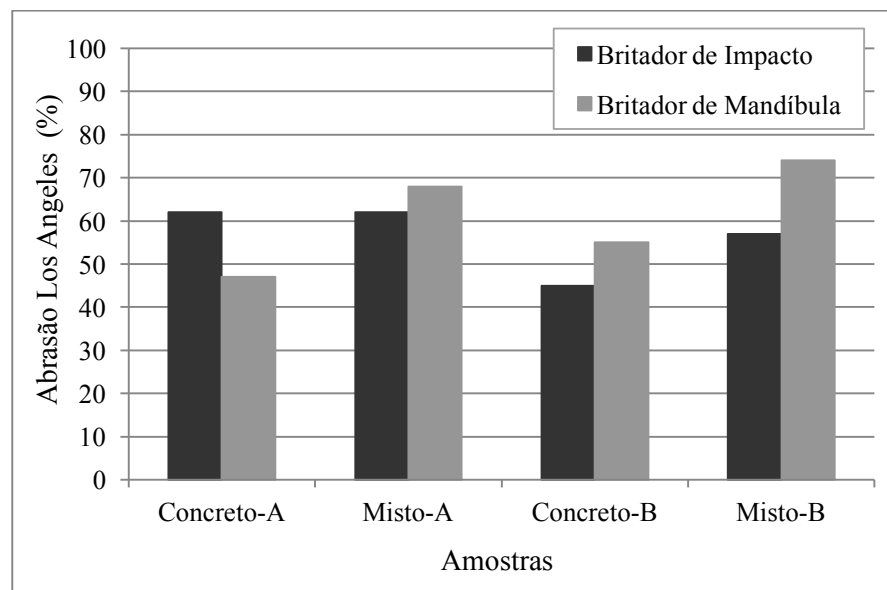
FONTE: A autora (2015).

4.2.1. Abrasão Los Angeles das amostras

No âmbito da característica dos agregados reciclados (fração brita) de resistirem ao desgaste pela abrasão, a natureza mista do material fez com que os agregados tivessem valores de resistência à abrasão relativamente menores que os agregados de concreto. E não só a natureza teve poder de influenciar os índices baixos de abrasão mas também, a porosidade do material, que está relacionada com a absorção de água e com o teor de argamassa aderida ao grão.

A FIGURA 54 mostra os resultados de abrasão Los Angeles das amostras. Das quatro combinações de comparação entre as amostras, três tiveram os maiores valores de abrasão Los Angeles nos agregados britados na mandíbula. Só a amostra de concreto do lote A que esse comportamento se inverteu para os agregados britados por impacto.

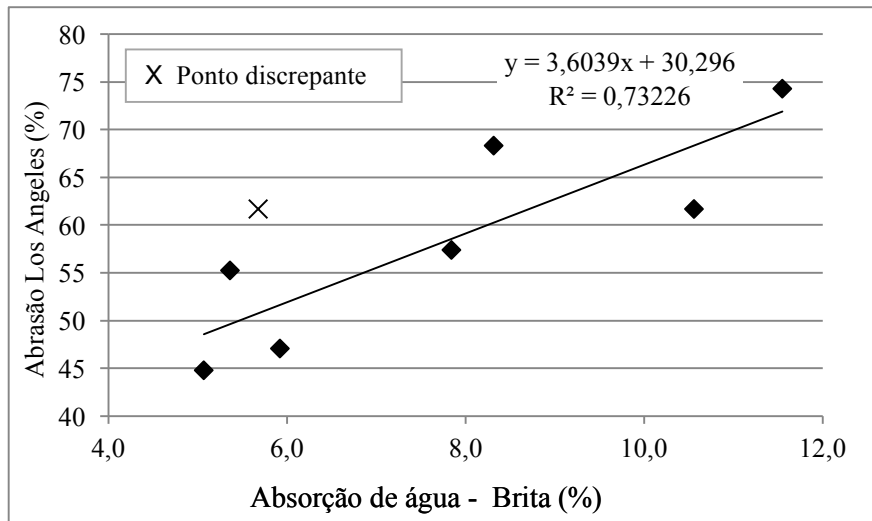
FIGURA 54 - RESULTADO DE ABRASÃO LOS ANGELES PARA AGREGADOS RECICLADOS



FONTE: A autora (2015).

A abrasão Los Angeles demonstrou correlação com a propriedade de absorção de água dos agregados e teor de argamassa aderida ao grão. A tendência da correlação abrasão Los Angeles x absorção de água resumiu-se em quanto maior for o resultado de abrasão maior a absorção de água do agregado reciclado, conforme FIGURA 55. A maior porosidade dos agregados minimizou a resistência deles ao desgaste pela abrasão.

FIGURA 55 - RELAÇÃO ABRASÃO LOS ANGELES X ABSORÇÃO DE ÁGUA NA FRAÇÃO BRITA

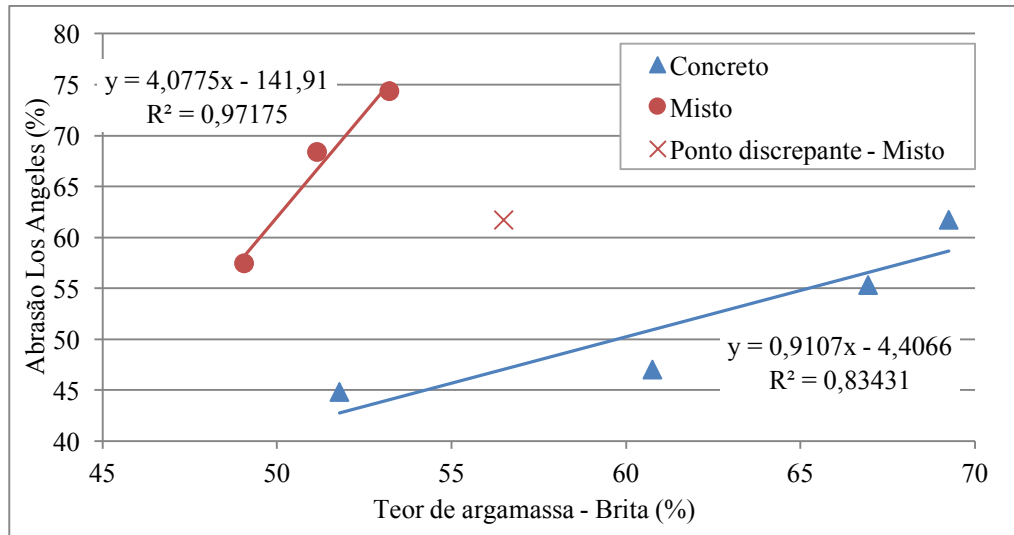


FONTE: A autora (2015).

Separando as amostras pela sua origem, pode-se notar que tanto nas amostras mistas quanto nas de concreto, quanto maior o teor de argamassa aderida, maior a abrasão Los Angeles. As amostras mistas apresentaram menores valores de argamassa aderida mas alcançaram os maiores valores de abrasão. Sendo assim, o material misto mostrou-se menos resistente à abrasão que o material de concreto. Os teores mais altos de argamassa aderida nos agregados reciclados de concreto não foram tão influentes no aumento da abrasão quanto à natureza dos agregados mistos, o que pode ser observado pelo coeficiente angular das retas de regressão apresentadas na FIGURA 56.

A propriedade de resistência ao desgaste por abrasão das amostras de brita está indiretamente ligada ao método de britagem, porque dependendo de quanto o britador remove a argamassa aderida vai gerar maior ou menor valor para abrasão. Agregados britados no impacto terão de certa forma, menor teor de argamassa aderida, que consequentemente gerarão menor valor de abrasão. E por um outro viés a natureza dos RCD interfere na propriedade de absorção de água, maior absorção de água remete que o agregado seja mais poroso, ele sendo mais poroso sugere-se que seja mais fraco e assim atingiria valores maiores de abrasão.

FIGURA 56 - RELAÇÃO ABRASÃO LOS ANGELES X TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA NA FRAÇÃO BRITA



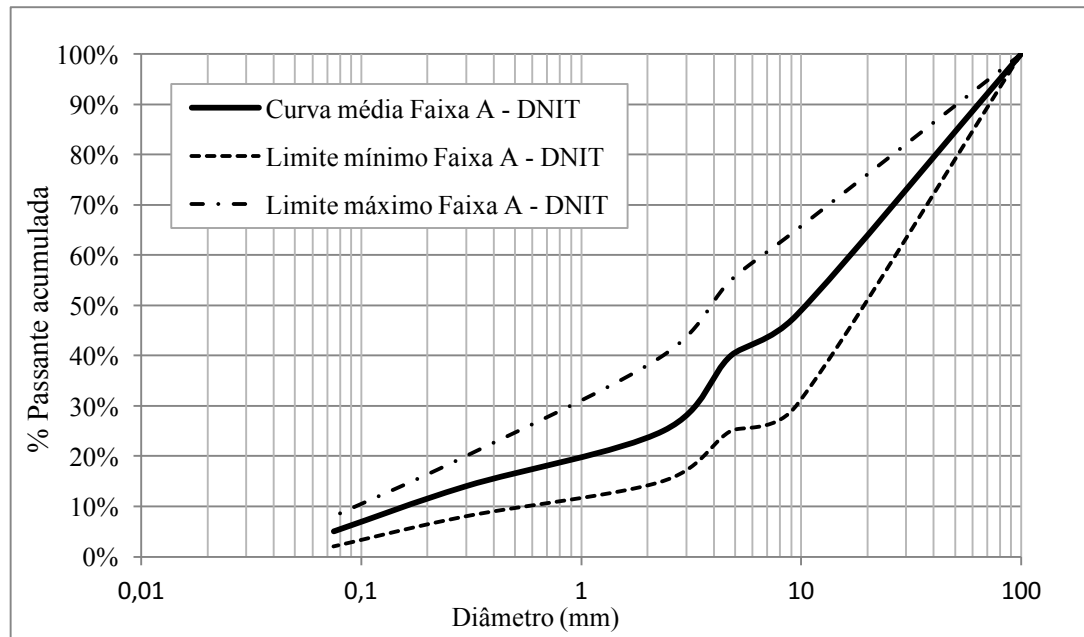
FONTE: A autora (2015).

4.2.2. Índice de Suporte Califórnia

Os ensaios de Índice de Suporte Califórnia foram feitos nas curvas granulométricas médias da Faixa A do DNIT 141 (2010), conforme FIGURA 57. Como já foi visto que os britadores geraram curvas granulométricas diferentes, optou-se pela composição padronizada a fim de eliminar esse fator de diferença entre os britadores.

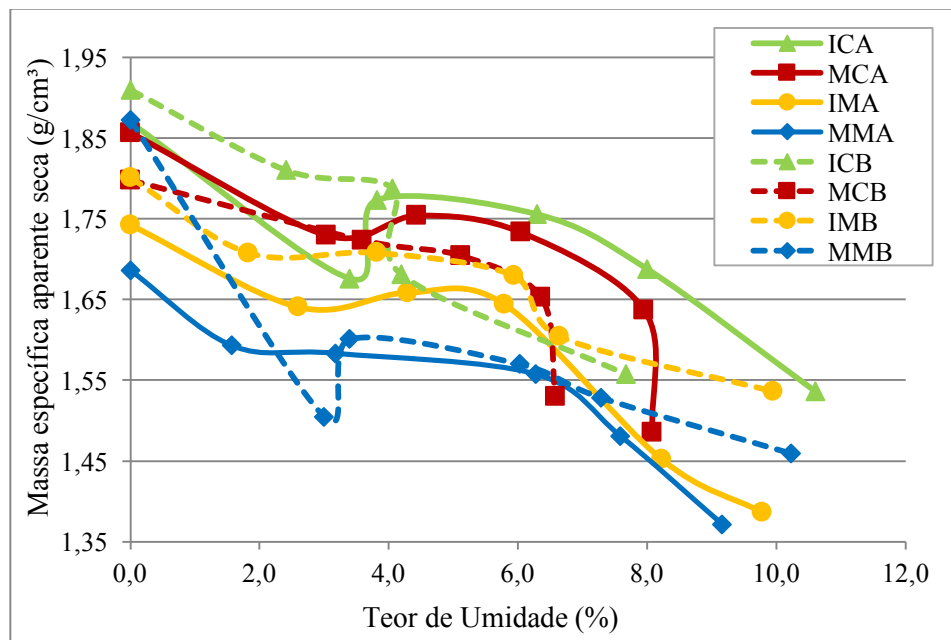
O método de vibração para a moldagem dos corpos de prova inviabilizou a determinação de uma umidade ótima para as amostras. Os grãos de agregados reciclados atingiram um melhor empacotamento quando vibrados secos. Na tentativa de obtenção de umidade ótima acrescentaram-se quantidades de água e com os acréscimos a massa específica aparente seca não foi maior que a medida com o material seco. Em todas as amostras essa massa específica aparente seca foi maior quando a umidade era igual a zero (FIGURA 58).

FIGURA 57 - CURVA GRANULOMÉTRICA MÉDIA FAIXA A – DNIT



FONTE: A autora (2015).

FIGURA 58 - MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA X TEOR DE UMIDADE



FONTE: A autora (2015).

Realizaram-se os cálculos de índices de vazios de cada amostra e mesmo adotando o mesmo procedimento de vibração para todas as amostras individualmente, não houve um

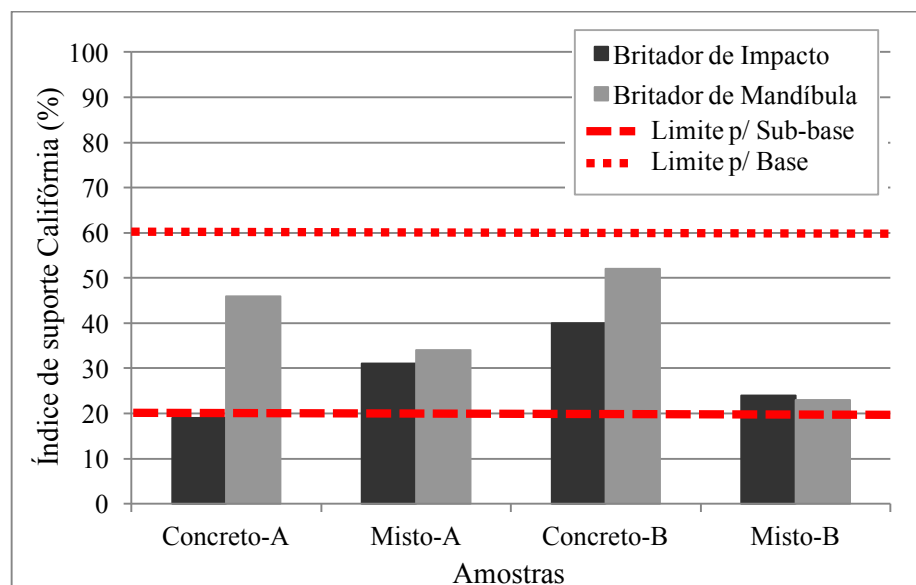
comportamento homogêneo nos resultados. Em decorrência disso, optou-se por não usar os dados de índice de vazios para correlacioná-los com os resultados de ISC.

Outra propriedade afetada pela vibração foi a expansibilidade durante a imersão dos corpos de prova de ISC. Ao invés de expansão as amostras apresentaram retração, o que pode ser justificado pelo processo de vibração que não reduziu suficientemente os vazios durante a moldagem dos corpos de prova fazendo com que a imersão em água e a sobrecarga usada na imersão conferissem às amostras um reajuste das partículas no lugar dos vazios nelas existentes.

Os resultados para o ensaio de ISC estão apresentados na FIGURA 59. Observou-se que não houve diferença de ISC entre os britadores para as amostras mistas, mas para ambas as amostras de concreto produzidas no britador de mandíbulas apresentaram maior ISC que as produzidas no britador de impacto. Entretanto, não é possível justificar este comportamento em função das propriedades de forma dos grãos, abrasão Los Angeles e massa unitária vibrada seca. Também não é possível em função da distribuição granulométrica, uma vez que é a mesma para todas as amostras. E a diferença de absorção de água entre as amostras de concreto é muito pequena para se justificar em função desta propriedade.

Devido à origem do material, era de se esperar que as amostras de agregado de concreto apresentassem maior ISC que as mistas, o que não ocorreu em apenas uma amostra, a de concreto no impacto do lote A, que obteve ISC de 19%, o menor índice de todas as amostras lote A e B.

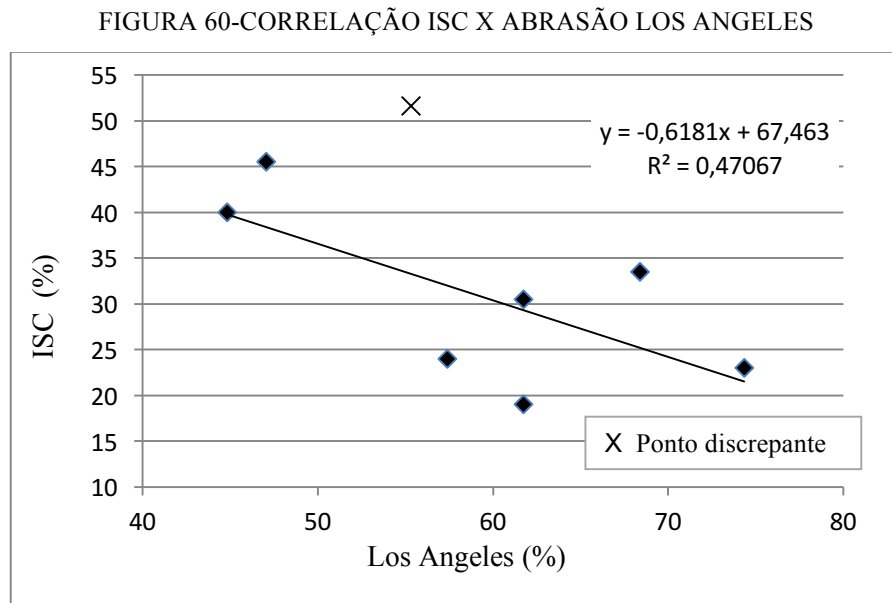
FIGURA 59 - RESULTADOS DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA



FONTE: A autora (2015).

Quanto às exigências de ISC estabelecidos pela NBR 15116 (ABNT, 2004b) de $\geq 60\%$ para agregados usados em base e $\geq 20\%$ para sub-base de pavimentos, o valor de 20% foi atendido por todas as amostras exceto a de concreto do lote A britada no impacto. Mesmo moldando os corpos de prova com o processo de vibração, obtiveram-se valores de ISC satisfatórios para aplicar os agregados reciclados em sub-base de pavimentos. Mas analisando o limite para aplicação em base de pavimentos, nenhuma das amostras atendeu ao limite da norma.

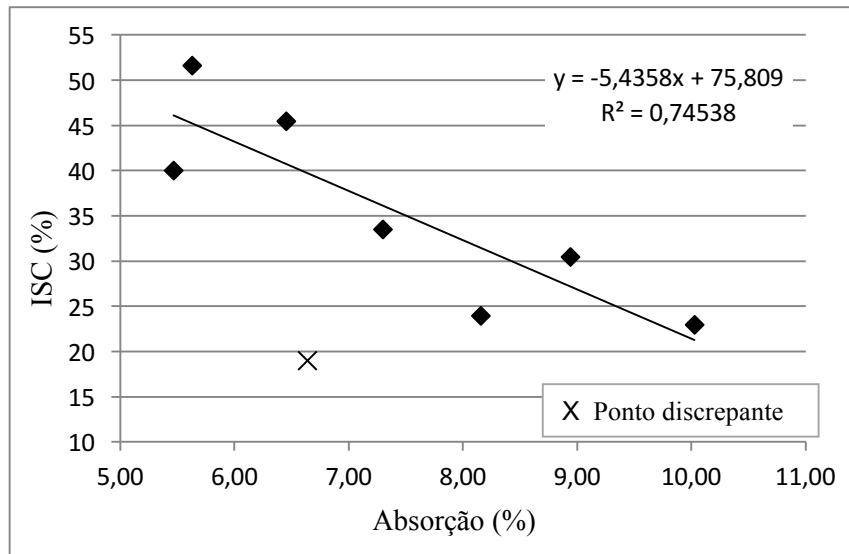
O ISC teve pequena correlação com a abrasão Los Angeles, lembrando que o valor baixo do R^2 pode ser justificado pelo fato dos valores de abrasão se referirem apenas à fração brita (FIGURA 60).



FONTE: A autora (2015).

Pode-se também correlacionar os valores de Índice de Suporte Califórnia com a absorção de água proporcional a quantidade de material de cada fração que compôs o corpo de prova do ISC. Assim como na correlação anterior, à medida que a propriedade correlacionada aumentou, nesse caso a absorção, diminuiu o ISC (FIGURA 61).

FIGURA 61-CORRELAÇÃO ISC X ABSORÇÃO DE ÁGUA



FONTE: A autora (2015).

5. CONCLUSÕES

A análise das propriedades dos agregados reciclados contribuiu para o cumprimento do objetivo desta pesquisa de avaliar se os britadores de mandíbula e impacto exerceriam sobre eles influência no que se refere à aplicação em bases e sub-bases de pavimentos.

Na composição granulométrica foi possível visualizar a capacidade de produção de uma curva granulométrica mais fina nos agregados britados no britador de impacto comparado ao britador de mandíbula. A natureza do material também teve sua parcela de influência na curva granulométrica, pois as maiores quantidades de frações mais finas foram encontradas nas amostragens de origem mista. A produção da fração areia ($< 4,8$ mm) foi maior nas amostras cominuídas no britador de impacto. As amostras mistas produzidas no britador de mandíbulas e as de concreto feitas no britador de impacto são as que apresentaram distribuições granulométricas que melhor se encaixaram nos limites máximo e mínimo da Faixa A do DNIT 141 (2010). No caso de produção de brita corrida, como o volume de resíduo misto no país é muito maior que o de concreto, o britador de mandíbulas neste quesito é mais vantajoso.

Analisando a forma dos grãos, para os agregados miúdos nos itens arredondamento e esfericidade os resultados não demonstraram comportamento uniforme nos lotes A e B em função dos britadores, mesmo as amostras tendo diferenças significativas entre elas. Ainda sobre a fração miúda, o índice de forma não se diferenciou na amostra A entre os britadores e na B houve diferenças, mas não o bastante para afirmar que um britador gera grãos de areia mais cúbicos que outro. O índice de forma na fração graúda, assim como na miúda, para cada material não apresentou diferenciação entre os britadores.

Na geração de material fino < 75 μm , o britador de impacto em três das quatro amostras gerou maiores valores quando comparado à mandíbula e em uma amostra os valores entre os britadores foram os mesmos. Foi visível a diferença também em relação à origem dos agregados, os de natureza mista tiveram maior quantidade de finos < 75 μm que os agregados compostos de resíduos de concreto.

Os ensaios de massa unitária mostraram maiores valores para os agregados processados no britador de impacto em todas as quatro amostras, reflexo da maior produção de areia por esse britador, contribuindo assim para o melhor ajuste entre partículas e fechamento de vazios. As massas unitárias no material misto foram menores que no material de concreto.

Utilizando três métodos para a medição de absorção de água nos agregados miúdos, percebeu-se o mesmo comportamento entre os métodos, quanto maior a absorção menor a massa específica aparente. Nessa correlação da absorção o R^2 foi maior no método da NBR NM 30 (ABNT, 2001a) sem finos $< 75 \mu\text{m}$ e as amostras produzidas no britador de impacto apresentaram maiores valores de absorção em três das quatro amostras. Nos agregados graúdos, foi a natureza do material que influenciou a absorção de água sem interferência do método de britagem, segundo os dados estatísticos que não mostraram diferenças significativas entre os britadores.

Devido ao método de cominuição do britador de impacto, tanto no material misto quanto no de concreto a quantidade de argamassa aderida aos grãos foi menor que no britador de mandíbula na fração pedrisco, mostrando a maior capacidade desse britador em retirar argamassa aderida no processo de britagem. Nas frações brita e rachão os resultados não indicaram uma melhor eficiência de um britador sobre o outro.

No desgaste por abrasão Los Angeles, notaram-se maiores valores de abrasão para os agregados mistos, devido à sua maior porosidade comparados aos agregados de concretos utilizados. Em três das quatro amostras os agregados britados na mandíbula tiveram maiores resultados de abrasão Los Angeles, destacando novamente que o britador de impacto é mais eficiente na retirada de argamassa aderida proporcional a cada tipo de material (misto e concreto).

Com os valores obtidos de ISC, no britador de mandíbula todas as quatro amostras ficaram acima do limite mínimo de 20% para aplicação de agregados reciclados em sub-base, no britador de impacto apenas uma das amostras ficou abaixo desse limite. Esses resultados mostraram que essas amostras poderiam ser usadas em sub-base de pavimentos. Para o uso em base o limite mínimo é 60% inviabilizando o uso de qualquer uma das amostras para esse fim. Nos agregados mistos não houve diferença relevante de valores de ISC em função dos britadores, já nos agregados reciclados de concreto o britador de mandíbula apresentou maiores valores de ISC.

Assim, pode-se afirmar que o tipo de britador não influenciou significativamente nas propriedades dos agregados reciclados usados em base de pavimentos. A afirmação de que o tipo de britador influencia na forma das partículas não foi comprovada e a principal diferença encontrada foi na curva granulométrica produzida por cada britador.

Para o aprimoramento da avaliação da influência dos britadores de mandíbula e de impacto sobre as propriedades dos agregados reciclados aplicados em base e sub-base de pavimento, sugere-se em trabalhos futuros o estudo de:

- teor de argamassa aderida na fração areia;
- comparação do Índice de Suporte Califórnia determinados por vibração e com compactação naumidade ótima para verificação de possíveis valores mais altos de ISC, viabilizando o uso do agregado reciclado em base de pavimentação;
- aplicação de uma reta de regressão linear para ISC com maior número de amostras;
- medição de resiliência e do índice de degradação após compactação Proctor.

REFERÊNCIAS

ABRECON. **Relatório pesquisa setorial: a reciclagem de resíduos de construção e demolição.** São Paulo, 2013.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no brasil.** São Paulo, 2014.

ANGULO, S. C. ; MIRANDA, L. F. R. ; JOHN., V.M. . **Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil.**In: Sustainable Buildings 2002, 2002, Oslo. Sustainable Buildings, 2002.

ANGULO, S. C. et al. **Processamento de resíduos de construção e demolição em usinas de reciclagem européias.** ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 2009, Feira de Santana, BA.

ANGULO, S. C.; JOHN V.M. **Requisitos para execução de aterros de resíduos de construção e demolição.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/436. São Paulo, 2006. ISSN 0103-9830.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11804: **Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente - Especificação,** Rio de Janeiro, 1991a.

_____. NBR 12051: Solo – **Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos – método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1991b.

_____. NBR 15115: **Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Execução de Camadas de Pavimentação.** Rio de Janeiro, 2004a.

_____. NBR 15116: **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil:Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.** Junho, 2004b.

_____. NBR 6954: **Lastro Padrão - Classificação.** Rio de Janeiro, 1989.

_____. NBR 7182: **Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 1988.

_____. NBR 7809: **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 9895: Solo - **Índice de suporte Califórnia - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 9935: **Agregados - Terminologia**, Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR NM 248. **Agregados - Determinação da distribuição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. NBR NM 30. **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001a.

_____. NBR NM 45. **Agregado - Determinação da densidade de massa e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM 46. **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. NBR NM 51. **Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"**. Rio de Janeiro, 2001b.

_____. NBR NM 52. **Agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. NBR NM 53. **Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009b.

BARBUDO, A.; AGRELA, F.; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J. R.; POON, C. S. **Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications**. Construction and Building Materials, v. 28, n. 1, p.129-138, mar. 2012.

BENNERT, T.; PAPP JR., W. J.; MAHER, A.; GUCUNSKI, N. **Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loadind in base e subbases applications**. Transportation Research Record, Washington, n.1714, p.33-39, 2000.

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

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

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

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem**, volume 3, 2012, Signus, São Paulo.

CONAMA. **MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA**. Resolução nº307, de 05 de julho de 2002. Brasília DF, n. 136, 17 de julho de 2002. Seção 1.

_____. Resolução nº348, de 16 de agosto de 2004. Brasília DF, n. 158, 17 de agosto de 2004. Seção 1.

COPPEAD. **Índice de transporte rodoviário**. Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração, Universidade Federal do rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

CURITIBA. **Decreto nº1.068, de 18 de novembro de 2004**. Institui o regulamento do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil do município de Curitiba e altera disposições do Decreto nº1.120/97. Curitiba, 2004.

DAMINELI B. L. **Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica: tradução da sétima edição norte-americana**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ME 035/1998: **Agregados - determinação de abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, 1998a.

_____. DNER-ME 049/1994: **Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1998b.

_____. DNER-ME 141/2010: **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente**. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. DNIT-ME 141/2010: **Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Manual de Pavimentação**. 3º ed. Rio de Janeiro, 2006, 274 p.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação**. 2004. 109p. Dissertação (Mestrado). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ). Rio de Janeiro, 2004.

FERREIRA, L. M. M. **Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão Influência da pré-saturação**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, United States. 1997. Report no FHWA-RD-97-148 – **User Guidelines for waste and by-product materials in pavement construction**. Disponível em: <<http://www.rmrc.unh.edu/resources/cd/userguide/begin.htm>>. Acesso em: 23 de ago. 2015.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de rochas na construção civil**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo, 2002.

FUCALE, S. P. ; Proença, F. **Analysis of Physical and Mechanical Properties of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste for Paving Work**. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 19, p. 3797-3806, 2014.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção de rodovia**. 163 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

HANSEN, T. C. **Recycled agregares and recycled aggregate concrete second state of the art report developments**. RILEM Report of Technical Committee 37-DRC, 1985.

HANSEN, T. C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. Report of Technical Committee 37-DRC, Demolition and reuse of concrete. RILEM report 6. London; New York: E & FN Spon, 1992.

HANSEN, T. C. **Recycling of Demolished Concrete and Masonry**. Report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete. RILEM. Londres, Taylor & Francis e-Library, 2005.

HANSEN, T. C.; NARUD, H. **Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate**. Concrete International, v.5, n.1, p. 79-83, Jan. 1983.

HAWLITSCHKE, G. **Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

HEINECK, S. **Desempenho de argamassas de revestimento com incorporação da fração miúda da britagem de concreto.** 2012. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; AGRELA, F., LÓPEZ, M., GALVÍN, A. P. **Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads.** Resources, Conservation And Recycling, [s.l.], v. 58, p.88-97, jan. 2012.

JOHN, V. M. ANGULO, S. C. **Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos.** Utilização de resíduos na construção habitacional. Porto Alegre: ANTAC, 2003.

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

KANEKO, R. F. **Desenvolvimento de método para determinação da absorção de água em agregados miúdos reciclados através de micro-ondas.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

KING, R. P.; **Modeling and simulation or mineral processing systems.** ButterworthHeinemann, 2001.

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimento.** 2007. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LEITE, F. C.; MOTTA, R. S., VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. **Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements.** Construction And Building Materials, [s.l.], v. 25, n. 6, p.2972-2979, jun. 2011.

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

LIMA, F. M. R. S. **A formação da mineração urbana no Brasil reciclagem de RCD e a produção de agregados.** 2013. 178 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2007. 182p.

LUZ, A. B. ; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios.** 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM – Centro de tecnologia mineral e CNPq., 2010.

METALÚRGICA SANTA RITA. **Britador de mandíbulas.** Disponível em: <<http://www.msr.com.br/ct/curiosidades/britador-de-mandibulas/>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

METSO. **Britador de impacto.** Disponível em: <[http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/1E76CD497587F984C1257115004B1691/\\$File/NP_Port.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/1E76CD497587F984C1257115004B1691/$File/NP_Port.pdf)>. Acesso em: 07 out. 2015a.

METSO. **Britador de mandíbula.** Disponível em: <[http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/0D7557574F5A77CD42256B7B00342A2A/\\$File/C_Series_Portuguese.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/0D7557574F5A77CD42256B7B00342A2A/$File/C_Series_Portuguese.pdf)>. Acesso em: 07 out. 2015b.

METSO. **Guia de aplicação das peças de desgaste.** São Paulo, 2012. Disponível em: <[http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/14879F6C5509BF2AC22579A7002B3009/\\$File/2715_C.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/14879F6C5509BF2AC22579A7002B3009/$File/2715_C.pdf)>. Acesso em: 07 out. 2015c.

MIRANDA, L. F. R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos classe Aada construção civil.** 2005. 438 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MOLENNAR, A.A; NIEKERK, A. A. V. **Effects of Gradation, Composition, and Degree of Compaction on the Mechanical Characteristics of Recycled Unbound Materials.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2002.

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de Resíduos de Construção e Demolição em bairros periféricos de Uberlândia: Subsídios para uma gestão sustentável.** Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

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

MOTTA, R. S; BERNUCCI, L. L. B; MOURA, E. **Aplicação de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em camadas de pavimentos.** In. XVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET. Anais.Florianópolis.SC. 2004.

NATAATNADJA, A; TAN, Y. L. **Resiliente response of recycled concrete road aggregates.**Journal of Transportation Engineering, Reston, Virginia, V.127, n.5, p. 450-453, 2001.

NENO, C. J. F. **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração de betão.** Dissertação (Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2010.

NÓBREGA, R. D. ; MELO, R. A. **Uso de agregados de resíduos da construção civil na pavimentação urbana em João Pessoa.** In: ENARC2009 Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2009, Feira de Santana. Anais do Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos ENARC2009. 2009.

NUNES, K. R. A. **Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição.** Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

PINTO, T. P. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** São Paulo, 1999. 189p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. **Manejo e gestão de resíduos da construção civil.** Brasília: CEF, 2005. v. 1. 196 p. (Manual de orientação: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios, v. 1).

PMSP - PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. São Paulo, 2008. **Uso de entulho reciclado torna-se obrigatório na capital.** Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/portal/a_cidade/noticias/index.php?p=14065>. Acesso em: 26 de novembro de 2008.

POON, C. S.; CHAN, D. **Feasible use of concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base.**Construction and Building Materials. 2006.

PROGUARU. **Site.** 2015. Disponível em: <<http://www.proguaru.com.br>>. Acesso em: 05 ago. 2015.

ROBSON, C. **Real World Research: a resource for social scientists and practitioner – researches.**2 ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2002.

SAEED, A; HAMMONS, M. I.; REED, J. L. **Comprehensive Evaluation, Design, and Construction Techniques for Airfield Recycled Concrete Aggregate as Unbound Base.** In: Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Washington DC, United States, 2007. 16p.

SANCHEZ, M. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.** Tese de Doutorado, Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.

SÃO PAULO. **Decreto nº48.075, de 28 de dezembro de 2006.** Uso de agregados em obras públicas municipais. São Paulo, 2006.

SILVA, P. C. G. ; MIRANDA, L. F. R. . **Análise da influência do controle granulométrico nas características físicas e mecânicas de agregados reciclados para pavimentação.** In: ENTAC 2008, Fortaleza, 2008.

SILVA, P. C. G. ; MIRANDA, L. F. R. SOUZA E. S. **Análise da eficiência do controle granulométrico na melhoria de desempenho de brita corrida reciclada produzida em usinas de reciclagem.** In: ENARC 2015, São Paulo, 2015.

SINDUSCON-SP. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil - A experiência do SINDUSCON-SP.** São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.sindusconsp.com.br>>. Acesso em março 2014.

STURTEVANT, J. R. **Performance of rigid pavements containing recycled concrete aggregates.** 2006. 139p. Thesis (Master of Science) - University of New Hampshire, New Hampshire, USA, 2007.

TEGGUER, A. D. **Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach.**In: Construction and Building Materials 27 (2012) 112–116.

TRISTANTE, R. A.; GASPAR, R.; MORETTI, R. S. **Condicionantes da subutilização de resíduos da construção civil.** Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos da Construção - ENARC 2009, Feira de Santana, Bahia, 2009.

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias na propriedades das argamassas mistas de revestimento.** 286 f. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TSENG, E. **Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do rodoanel metropolitano Mário Covas.** 220 f. 2010. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

VALLE, N. **Utilização de solos residuais saprolíticos na pavimentação rodoviária em Santa Catarina.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1994.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C.; LIMA, F. B. Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. Revista Engenharia Civil. Universidade do Minho. Número 19, 2004, p.5-18. Disponível em: <<http://www.civil.uminho.pt/cec/revista/revista.htm>>. Acesso em: 23 de ago 2015.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland.** 295 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

WILLS, B. A.; MUNN, T. N. **Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.** 7. ed.: Elsevier Science & Technology Books, 2006. 450 p.

YIN, R. K. - **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

APÊNDICE A - FORMA DOS GRÃOS NA FRAÇÃO MIÚDA

		Área	Perim.	Feret	Min. Feret	Arrend.	Esferic.	Índice de forma
ICA	Média	0,099	1,774	0,486	0,303	0,512	0,403	1,656
	Desvio padrão	0,057	0,624	0,136	0,091	0,118	0,138	0,413
	Coef. de variação	0,58	0,352	0,28	0,301	0,231	0,341	0,249
MCA	Média	0,083	1,567	0,443	0,277	0,511	0,44	1,655
	Desvio padrão	0,052	0,7	0,139	0,095	0,125	0,149	0,414
	Coef. de variação	0,628	0,446	0,315	0,341	0,245	0,338	0,25
IMA	Média	0,179	2,259	0,62	0,42	0,57	0,455	1,504
	Desvio padrão	0,088	0,742	0,161	0,109	0,11	0,141	0,289
	Coef. de variação	0,495	0,329	0,26	0,259	0,192	0,31	0,192
MMA	Média	0,061	1,4	0,371	0,247	0,542	0,403	1,548
	Desvio padrão	0,035	0,517	0,113	0,075	0,125	0,134	0,4
	Coef. de variação	0,572	0,369	0,304	0,306	0,231	0,331	0,258
ICB	Média	0,130	2,428	0,560	0,368	0,516	0,303	1,560
	Desvio padrão	0,071	0,918	0,159	0,099	0,107	0,122	0,402
	Coef. de variação	0,542	0,378	0,285	0,270	0,208	0,404	0,258
MCB	Média	0,031	1,272	0,285	0,178	0,464	0,255	1,664
	Desvio padrão	0,018	0,468	0,078	0,053	0,112	0,106	0,467
	Coef. de variação	0,582	0,368	0,273	0,299	0,242	0,415	0,280
IMB	Média	0,033	1,479	0,284	0,190	0,479	0,204	1,526
	Desvio padrão	0,021	0,601	0,080	0,057	0,106	0,099	0,297
	Coef. de variação	0,646	0,406	0,282	0,302	0,221	0,483	0,195
MMB	Média	0,035	1,117	0,289	0,186	0,505	0,375	1,603
	Desvio padrão	0,023	0,429	0,084	0,060	0,111	0,149	0,370
	Coef. de variação	0,665	0,384	0,290	0,323	0,220	0,398	0,231

APÊNDICE B - ARREDONDAMENTO, ESFERICIDADE E ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO MIÚDO

Apêndice B.1 - Arredondamento: Média e variância - Amostra A

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
IMA	165	95,273735	0,5774166	0,0117547
MMA	165	89,075615	0,5398522	0,0149936
ICA	165	84,510754	0,5121864	0,0139977
MCA	165	83,886348	0,5084021	0,0160365

Apêndice B.2 - Arredondamento: Modelo estatístico ANOVA - Amostra A

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,5031627	3	0,1677209	11,81498	1,519E-07	2,6184824
Dentro dos grupos	9,3123223	656	0,0141956			
Total	9,815485	659				

Apêndice B.3 - Arredondamento: Média e variância - Amostra B

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
IMB	200	96,045	0,480225	0,011028527
MMB	200	101,026	0,50513	0,012342636
ICB	200	103,112	0,51556	0,011549283
MCB	200	92,699	0,463495	0,012517347

Apêndice B.4 - Arredondamento: Modelo estatístico ANOVA - Amostra B

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,3350868	3	0,111695608	9,41828038	4,03493E-06	2,616089
Dentro dos grupos	9,4401208	796	0,011859448			
Total	9,7752076	799				

Apêndice B.6 - Esfericidade: Média e variância - Amostra A

Apêndice B.5 - Arredondamento: Modelo estatístico Test t entre os britadores – Amostra A e B

	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>
Média	0,577417	0,539852	0,512186	0,508402	0,480225	0,50513	0,51556	0,463495
Variância	0,011755	0,014994	0,013998	0,016036	0,011029	0,012343	0,011549	0,012517
Observações	165	165	165	165	200	200	200	200
Correlação de Pearson	0,037602		0,040213		0,059958		0,132854	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0	
Gl	164		164		199		199	
Stat t	3,006976		0,286292		2,376106		5,096596	
P(T<=t) uni-caudal	0,001527		0,387508		0,009223		4,01E-07	
t crítico uni-caudal	1,654198		1,654198		1,652547		1,652547	
P(T<=t) bi-caudal	0,003054		0,775016		0,018446		8,02E-07	
t crítico bi-caudal	1,974535		1,974535		1,971956		1,971956	

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
IMA	165	77,264978	0,4682726	0,0189345
MMA	165	67,559805	0,4094534	0,0174941
ICA	165	66,568677	0,4034465	0,0189423
MCA	165	72,55331	0,439717	0,0222818

Apêndice B.7 - Esfericidade: Modelo estatístico ANOVA - Amostra A

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,4432337	3	0,1477446	7,6105335	5,232E-05	2,6184824
Dentro dos grupos	12,73504	656	0,0194132			
Total	13,178274	659				

Apêndice B.8 - Esfericidade: Média e variância - Amostra B

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
IMB	200	40,88	0,2044	0,009722462
MMB	200	74,979	0,374895	0,022285743
ICB	200	60,607	0,303035	0,014973773
MCB	200	50,913	0,254565	0,011188659

Apêndice B.9 - Esfericidade: Modelo estatístico ANOVA - Amostra B

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,1653222	3	1,0551074	72,55257802	1,735E-41	2,616089
Dentro dos grupos	11,575957	796	0,0145427			
Total	14,741279	799				

Apêndice B.10 - Esfericidade: Modelo estatístico Test t entre os britadores – Amostra A e B

	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>
Média	0,468273	0,409453	0,403447	0,439717	0,303035	0,254565	0,2044	0,374895
Variância	0,018934	0,017494	0,018942	0,022282	0,014974	0,011189	0,009722	0,022286
Observações	165	165	165	165	200	200	200	200
Correlação de Pearson	0,076087		0,015412		0,005512		0,099169	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0	
gl	164		164		199		199	
Stat t	4,118231		-2,3125		4,249487		14,13723	
P(T<=t) uni-caudal	3,02E-05		0,010996		1,65E-05		3,57E-32	
t crítico uni-caudal	1,654198		1,654198		1,652547		1,652547	
P(T<=t) bi-caudal	6,04E-05		0,021993		3,29E-05		7,14E-32	
t crítico bi-caudal	1,974535		1,974535		1,971956		1,971956	

Apêndice B.11 - Índice de forma do agregado miúdo: Média e variância - Amostra A

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
IMA	165	247,3393	1,499026	0,081824
MMA	165	255,7776	1,550167	0,135095
ICA	165	273,2143	1,655844	0,170663
MCA	165	274,9402	1,666304	0,1768

Apêndice B.12 – Índice de forma do agregado miúdo: Modelo estatístico ANOVA - Amostra A

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,298117	3	1,099372	7,791688	4,07E-05	2,618482
Dentro dos grupos	92,55865	656	0,141096			
Total	95,85677	659				

Apêndice B.13 - Índice de forma do agregado miúdo: Média e variância - Amostra B

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
IMB	200	305,231	1,526155	0,088295
MMB	200	320,548	1,60274	0,136686
ICB	200	311,951	1,559755	0,161644
MCB	200	332,796	1,66398	0,21668

Apêndice B.14 – Índice de forma do agregado miúdo: Modelo estatístico ANOVA - Amostra B

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,122543	3	0,707514	4,69092	0,002962	2,616089
Dentro dos grupos	120,0578	796	0,150826			
Total	122,1803	799				

Apêndice B.15 - Esfericidade: Modelo estatístico Test t entre os britadores – Amostra A e B

	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>
Média	1,499026	1,550167	1,655844	1,666304	1,526155	1,60274	1,559755	1,66398
Variância	0,081824	0,135095	0,170663	0,1768	0,088295	0,136686	0,161644	0,21668
Observações	165	165	165	165	200	200	200	200
Correlação de Pearson	0,02897		0,089171		0,017826		0,047617	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0	
gl	164		164		199		199	
Stat t	1,430696		-0,23884		2,263799		-2,4549	
P(T<=t) uni-caudal	0,07721		0,405764		0,012333		0,007476	
t crítico uni-caudal	1,654198		1,654198		1,652547		1,652547	
P(T<=t) bi-caudal	0,15442		0,811528		0,024665		0,014951	
t crítico bi-caudal	1,974535		1,974535		1,971956		1,971956	

APÊNDICE C - ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO GRAÚDO

Apêndice C.1 - Índice de forma do agregado graúdo: Média e variância - Amostra A

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
IMA	400	846,0522	2,11513	0,402656
MMA	400	831,6748	2,079187	0,474954
ICA	400	969,9183	2,424796	0,769048
MCA	400	1049,733	2,624332	1,75935

Apêndice C.2 – Índice de forma do agregado miúdo: Modelo estatístico ANOVA - Amostra A

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	81,29142	3	27,09714	31,82276	5,62E-20	2,610478
Dentro dos grupos	1358,997	1596	0,851502			
Total	1440,289	1599				

Apêndice C.3 - Índice de forma do agregado graúdo: Média e variância - Amostra B

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
IMB	400	857,9413	2,144853	0,637649
MMB	400	874,5143	2,186286	0,492601
ICB	400	903,6391	2,259098	0,667338
MCB	400	885,9867	2,214967	0,557222

Apêndice C.4 – Índice de forma do agregado miúdo: Modelo estatístico ANOVA - Amostra B

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,775607	3	0,925202	1,571596	0,194363	2,610478
Dentro dos grupos	939,5693	1596	0,588703			
Total	942,345	1599				

Apêndice C.5 – Índice de forma do agregado graúdo: Modelo estatístico Test t entre os britadores – Amostra A

	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>
Média	2,11513	2,079187	2,424796	2,624332
Variância	0,402656	0,474954	0,769048	1,75935
Observações	400	400	400	400
Correlação de Pearson	-0,0103		0,039408	
Hipótese da diferença de média	0		0	
gl	399		399	
Stat t	0,76345		2,465444	
P(T<=t) uni-caudal	0,222823		0,007052	
t crítico uni-caudal	1,648682		1,648682	
P(T<=t) bi-caudal	0,445646		0,014104	
t crítico bi-caudal	1,965927		1,965927	

APÊNDICE D - TEOR DE MATERIAL < 75 µm

Apêndice D.1 - Tabela de resultados individuais de material passante na peneira 75µm

Amostra	IMA	MMA	ICA	MCA	IMB	MMB	ICB	MCB
1	20,74%	13,61%	13,61%	10,38%	14,11%	10,03%	9,64%	9,60%
2	19,73%	13,49%	13,86%	11,30%	15,49%	10,35%	8,77%	9,10%
3	20,84%	12,02%	13,95%	11,61%	15,81%	10,56%	9,48%	7,95%
4	21,36%	11,78%	12,68%	11,59%	14,83%	11,54%	9,62%	7,77%

Apêndice D.2 - Material passante na peneira 75µm: Média e variância - Amostra A

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
IMA	4	0,8267	0,206675	4,64E-05
MMA	4	0,509	0,12725	9,19E-05
ICA	4	0,541	0,13525	3,38E-05
MCA	4	0,4488	0,1122	3,34E-05

Apêndice D.3 – Material passante na peneira 75µm: Modelo estatístico ANOVA - Amostra A

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,021157	3	0,007052	137,2268	1,5E-09	3,490295
Dentro dos grupos	0,000617	12	5,14E-05			
Total	0,021774	15				

Apêndice D.4 - Material passante na peneira 75µm: Média e variância - Amostra B

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
IMB	4	0,6024	0,1506	5,68E-05
MMB	4	0,4248	0,1062	4,24E-05
ICB	4	0,3751	0,093775	1,69E-05
MCB	4	0,3442	0,08605	7,87E-05

Apêndice D.5 - Material passante na peneira 75µm: Modelo estatístico ANOVA - Amostra B

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,009987	3	0,003329	68,37782	8,16E-08	3,490295
Dentro dos grupos	0,000584	12	4,87E-05			
Total	0,010571	15				

Apêndice D.6 - Material passante na peneira 75µm: Modelo estatístico Test t entre os britadores – Amostra A e B

	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>
Média	0,206675	0,12725	0,13525	0,1122	0,1506	0,1062	0,093775	0,08605
Variância	4,64E-05	9,19E-05	3,38E-05	3,34E-05	5,68E-05	4,24E-05	1,69E-05	7,87E-05
Observações	4	4	4	4	4	4	4	4
Correlação de Pearson	-0,72889		-0,19007		0,127656		-0,28247	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0	
gl	3		3		3		3	
Stat t	10,3917		5,156178		9,541954		1,433082	
P(T<=t) uni-caudal	0,000951		0,007072		0,001221		0,123638	
t crítico uni-caudal	2,353363		2,353363		2,353363		2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,001902		0,014145		0,002441		0,247275	
t crítico bi-caudal	3,182446		3,182446		3,182446		3,182446	

APÊNDICE E - MASSA UNITÁRIA DA AMOSTRA COMPLETA

Apêndice E.1 - Tabela de resultados individuais de massa unitária da amostra completa

Repetição	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
1	14,27	13,41	13,35	12,26	15,13	13,22	14,52	12,97
2	14,36	13,91	13,64	12,50	15,23	13,04	14,46	12,66
3	14,41	13,64	13,78	12,21	15,33	13,15	14,77	12,04
4	14,44	13,79	13,94	12,43	15,32	13,08	14,69	13,10

Apêndice E.2 - Massa unitária da amostra completa: Média e variância - Amostra A

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ICA	4	57,48	14,37	0,005533
MCA	4	54,75	13,6875	0,046425
IMA	4	54,71	13,6775	0,062692
MMA	4	49,4	12,35	0,018867

Apêndice E.3 - Massa unitária da amostra completa: Modelo estatístico ANOVA - Amostra A

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor-P	<i>F crítico</i>
Entre grupos	8,577025	3	2,859008	85,65248	2,27E-08	3,490295
Dentro dos grupos	0,40055	12	0,033379			
Total	8,977575	15				

Apêndice E.4 - Massa unitária da amostra completa: Média e variância - Amostra B

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ICB	4	61,01	15,2525	0,008692
MCB	4	52,49	13,1225	0,006292
IMB	4	58,44	14,61	0,020867
MMB	4	50,77	12,6925	0,223292

Apêndice E.5 - Massa unitária da amostra completa: Modelo estatístico ANOVA - Amostra B

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor-P	<i>F crítico</i>
Entre grupos	17,57767	3	5,859223	90,44046	1,66E-08	3,490295
Dentro dos grupos	0,777425	12	0,064785			
Total	18,35509	15				

Apêndice E.6 - Massa unitária da amostra completa: Modelo estatístico Test t entre os britadores – Amostra A e B

	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>
Média	14,37	13,6875	13,6775	12,35	15,2525	13,1225	14,61	12,6925
Variância	0,005533	0,046425	0,062692	0,018867	0,008692	0,006292	0,020867	0,223292
Observações	4	4	4	4	4	4	4	4
Correlação de Pearson	0,64056		0,295615		-0,48795		-0,44878	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0	
gl	3		3		3		3	
Stat t	7,700076		10,73001		28,59125		6,939259	
P(T<=t) uni-caudal	0,002276		0,000865		4,7E-05		0,003069	
t crítico uni-caudal	2,353363		2,353363		2,353363		2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,004552		0,001731		9,39E-05		0,006137	
t crítico bi-caudal	3,182446		3,182446		3,182446		3,182446	

APÊNDICE F - MASSA ESPECÍFICA DE TODAS AS FRAÇÕES

Apêndice F.1 - Tabela de resultados individuais de massa específica aparente de todas as frações

Fração	Repetição	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
Areia	1	2,07	2,09	2,13	2,12	2,17	2,16	2,04	2,05
	2	2,11	2,10	2,11	2,11	2,16	2,20	2,09	2,05
Pedrisco	1	2,26	2,17	1,90	1,92	2,21	2,20	1,94	1,92
	2	2,23	2,20	1,92	1,90	2,20	2,22	1,95	1,87
Brita	1	2,34	2,25	1,94	2,10	2,29	2,23	2,12	1,92
	2	2,33	2,26	2,00	2,09	2,27	2,28	2,11	1,89
Rachão	1	2,24	2,17	1,95	2,05	2,14	2,19	1,93	1,84
	2	2,25	2,20	2,03	2,08	2,21	2,24	2,05	1,85

Apêndice F.2 - Tabela de resultados individuais de massa específica de todas as frações

Fração	Repetição	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
Areia	1	2,64	2,50	2,50	2,38	2,53	2,47	2,47	2,47
	2	2,58	2,56	2,53	2,39	2,56	2,56	2,53	2,42
Pedrisco	1	2,70	2,61	2,57	2,56	2,55	2,57	2,55	2,44
	2	2,71	2,60	2,56	2,58	2,61	2,56	2,56	2,47
Brita	1	2,68	2,62	2,50	2,55	2,57	2,57	2,55	2,44
	2	2,67	2,60	2,51	2,53	2,58	2,61	2,55	2,34
Rachão	1	2,63	2,54	2,37	2,48	2,47	2,54	2,46	2,30
	2	2,61	2,61	2,45	2,51	2,53	2,55	2,47	2,40

APÊNDICE G- ABSORÇÃO DE ÁGUA COM MATERIAL < 75 µm E MÉTODO DO MICRO-ONDAS

Apêndice G.1 - Tabela de resultados individuais de absorção de água da areia com material < 75 µm - Método do Micro-ondas

Repetição	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
1	16,24%	13,00%	14,19%	13,78%	13,55%	11,59%	19,38%	15,40%
2	15,51%	11,84%	14,50%	12,15%	13,24%	11,54%	17,13%	15,90%
Média	15,88%	12,42%	14,35%	12,97%	13,40%	11,57%	18,26%	15,65%

Apêndice G.2 - Tabela de resultados individuais de absorção de água da areia com material < 75 µm - Método NBR

Repetição	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
1	10,37%	7,94%	6,98%	5,10%	6,48%	5,77%	8,40%	8,36%
2	8,57%	8,52%	7,96%	5,48%	7,15%	6,40%	8,46%	7,48%
Média	9,5%	8,2%	7,5%	5,3%	6,8%	6,1%	8,4%	7,9%

APÊNDICE H - ABSORÇÃO DE ÁGUA SEM MATERIAL < 75 µm

Apêndice H.1 - Tabela de resultados individuais de absorção de água da areia sem material < 75 µm - Método NBR

Repetição	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
1	8,24%	6,82%	6,15%	4,00%	5,67%	5,88%	7,85%	8,56%
2	7,35%	6,81%	5,29%	5,30%	5,86%	6,05%	7,79%	7,04%
3	7,16%	7,13%	6,73%	4,52%	5,95%	6,07%	7,31%	7,32%
4	7,43%	6,88%	6,42%	5,50%	5,71%	5,10%	8,19%	7,62%

Apêndice H.2 - Absorção de água da areia sem material < 75 µm - Método NBR: Média e variância - Amostra A

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ICA	4	0,301759	0,07544	2,31E-05
MCA	4	0,276406	0,069102	2,32E-06
IMA	4	0,245846	0,061462	3,83E-05
MMA	4	0,193094	0,048273	4,85E-05

Apêndice H.3 - Absorção de água da areia sem material < 75 µm - Método NBR: Modelo estatístico ANOVA - Amostra A

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00164	3	0,000547	19,49159	6,6E-05	3,490295
Dentro dos grupos	0,000336	12	2,8E-05			
Total	0,001976	15				

Apêndice H.4 - Absorção de água da areia sem material < 75 µm - Método NBR: Média e variância - Amostra B

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ICB	4	0,231874	0,057969	1,73E-06
MCB	4	0,230991	0,057748	2,1E-05
IMB	4	0,311374	0,077843	1,32E-05
MMB	4	0,305436	0,076359	4,38E-05

Apêndice H.5 - Absorção de água da areia sem material < 75 µm - Método NBR: Modelo estatístico ANOVA - Amostra B

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,001486	3	0,000495	24,8603	1,95E-05	3,490295
Dentro dos grupos	0,000239	12	1,99E-05			
Total	0,001725	15				

Apêndice H.6 - Absorção de água da areia sem material < 75 µm – Método NBR: Modelo estatístico Test t entre os britadores – Amostra A e B

	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>
Média	0,07544	0,069102	0,061462	0,048273	0,057969	0,057748	0,077843	0,076359
Variância	2,31E-05	2,32E-06	3,83E-05	4,85E-05	1,73E-06	2,1E-05	1,32E-05	4,38E-05
Observações	4	4	4	4	4	4	4	4
Correlação de Pearson	-0,57729		-0,30925		0,602374		0,271049	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0	
gl	3		3		3		3	
Stat t	2,179987		2,476372		0,112469		0,44779	
P(T<=t) uni-caudal	0,058675		0,044779		0,458778		0,342333	
t crítico uni-caudal	2,353363		2,353363		2,353363		2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,11735		0,089557		0,917555		0,684665	
t crítico bi-caudal	0,07544	0,069102	0,061462	0,048273	3,182446		3,182446	

APÊNDICE I- ABSORÇÃO DE ÁGUA DA FRAÇÃO PEDRISCO

Apêndice I.1 - Tabela de resultados individuais de absorção de água do pedrisco

Repetição	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
1	7,25	7,88	13,55	12,95	6,06	6,57	12,31	11,00
2	8,06	7,04	13,12	13,72	7,11	6,00	12,10	13,00
3	8,63	8,67	12,50	12,82	6,09	6,57	11,79	11,05
4	10,15	7,14	10,94	13,85	6,60	7,58	13,02	13,59

Apêndice I.2 – Absorção de água da areia do pedrisco - Amostra A

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ICA	4	34,09596	8,523989	1,498964
MCA	4	30,73328	7,683319	0,577323
IMA	4	50,10665	12,52666	1,308289
MMA	4	53,33943	13,33486	0,273126

Apêndice I.3 - Absorção de água do pedrisco: Modelo estatístico ANOVA - Amostra A

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	95,92362	3	31,97454	34,9668	3,28E-06	3,490295
Dentro dos grupos	10,97311	12	0,914426			
Total	106,8967	15				

Apêndice I.4 - Absorção de água do pedrisco: Média e variância - Amostra B

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ICB	4	25,85756	6,46439	0,244244
MCB	4	26,70707	6,676768	0,430296
IMB	4	49,22596	12,30649	0,271209
MMB	4	48,63959	12,1599	1,771223

Apêndice I.5 - Absorção de água do pedrisco: Modelo estatístico ANOVA - Amostra B

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	128,394	3	42,798	63,00837	1,29E-07	3,490295
Dentro dos grupos	8,150918	12	0,679243			
Total	136,5449	15				

Apêndice I.6 - Absorção de água do pedrisco: Modelo estatístico Test t entre os britadores – Amostra A e B

	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>
Média	8,523989	7,683319	12,52666	13,33486	6,46439	6,676768	12,30649	12,1599
Variância	1,498964	0,577323	1,308289	0,273126	0,244244	0,430296	0,271209	1,771223
Observações	4	4	4	4	4	4	4	4
Correlação de Pearson	-0,26174		-0,53632		-0,23373		0,67966	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0	
gl	3		3		3		3	
Stat t	1,050169		-1,08421		-0,46733		0,279504	
P(T<=t) uni-caudal	0,185387		0,178812		0,336056		0,39901	
t crítico uni-caudal	2,353363		2,353363		2,353363		2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,370773		0,357624		0,672112		0,79802	
t crítico bi-caudal	3,182446		3,182446		3,182446		3,182446	

APÊNDICE J - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA FRAÇÃO BRITA

Apêndice J.1 - Tabela de resultados individuais de absorção de água do brita

Repetição	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
1	5,52	6,24	11,63	8,50	4,79	5,82	7,95	11,00
2	5,54	5,85	10,30	8,31	5,30	5,51	8,25	10,25
3	5,58	6,06	10,66	7,69	5,61	4,04	7,58	12,44
4	6,09	5,56	9,64	8,76	4,59	6,09	7,61	12,50

Apêndice J.2 – Absorção de água da areia do brita - Amostra A

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ICA	4	22,7297	5,682426	0,075097
MCA	4	23,70483	5,926208	0,085356
IMA	4	42,23528	10,55882	0,685056
MMA	4	33,26353	8,315883	0,207933

Apêndice J.3 - Absorção de água do brita: Modelo estatístico ANOVA - Amostra A

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	62,97616	3	20,99205	79,70844	3,42E-08	3,490295
Dentro dos grupos	3,160326	12	0,26336			
Total	66,13649	15				

Apêndice J.4 - Absorção de água do brita: Média e variância - Amostra B

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ICB	4	20,29301	5,073252	0,219216
MCB	4	21,46834	5,367086	0,837952
IMB	4	31,38611	7,846528	0,099482
MMB	4	46,18523	11,54631	1,226194

Apêndice J.5 - Absorção de água do brita: Modelo estatístico ANOVA - Amostra B

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	107,6967	3	35,89889	60,26226	1,66E-07	3,490295
Dentro dos grupos	7,148531	12	0,595711			
Total	114,8452	15				

ApêndiceJ.6 - Absorção de água do brita: Modelo estatístico Test t entre os britadores – Amostra A e B

	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>
Média	5,682426	5,926208	10,55882	8,315883	5,073252	5,367086	7,846528	11,5463
Variância	0,075097	0,085356	0,685056	0,207933	0,219216	0,837952	0,099482	1,22619
Observações	4	4	4	4	4	4	4	4
Correlação de Pearson	-0,85414		-0,23741		-0,90295		-0,99043	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0	
gl	3		3		3		3	
Stat t	-0,89431		4,332225		-0,43428		-5,20951	
P(T<=t) uni-caudal	0,218525		0,011342		0,346712		0,006875	
t crítico uni-caudal	2,353363		2,353363		2,353363		2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,437049		0,022685		0,693424		0,013749	
t crítico bi-caudal	3,182446		3,182446		3,182446		3,182446	

APÊNDICE K - ABSORÇÃO DE ÁGUA DA FRAÇÃO RACHÃO

ApêndiceK.1 - Tabela de resultados individuais de absorção de água do rachão

Repetição	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
1	6,54	6,67	8,92	8,38	6,26	6,28	11,06	10,91
2	6,09	7,09	8,35	8,12	5,79	5,41	8,31	12,32
3	6,46	7,72	8,28	8,51	5,91	5,28	9,16	12,94
4	5,25	5,89	7,88	8,61	6,11	5,69	8,76	12,86

ApêndiceK.2 – Absorção de água da areia do rachão - Amostra A

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ICA	4	24,34701	6,086752	0,348613
MCA	4	27,37881	6,844702	0,589881
IMA	4	33,43296	8,358241	0,184666
MMA	4	33,61713	8,404283	0,044914

Apêndice K.3 - Absorção de água do rachão: Modelo estatístico ANOVA - Amostra A

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor- <i>P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	15,83031	3	5,27677	18,06999	9,55E-05	3,490295
Dentro dos grupos	3,504222	12	0,292018			
Total	19,33453	15				

ApêndiceK.4 - Absorção de água do rachão: Média e variância - Amostra B

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ICB	4	24,07237	6,018093	0,043733
MCB	4	22,66174	5,665434	0,194165
IMB	4	37,29174	9,322936	1,467024
MMB	4	49,03174	12,25793	0,883358

Apêndice K.5 - Absorção de água do rachão: Modelo estatístico ANOVA - Amostra B

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor- <i>P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	115,4346	3	38,4782	59,46528	1,79E-07	3,490295
Dentro dos grupos	7,76484	12	0,64707			
Total	123,1994	15				

Apêndice K.6 - Absorção de água do rachão: Modelo estatístico Test t entre os britadores – Amostra A e B

	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>
Média	6,086752	6,844702	8,358241	8,404283	6,018093	5,665434	9,322936	12,25793
Variância	0,348613	0,589881	0,184666	0,044914	0,043733	0,194165	1,467024	0,883358
Observações	4	4	4	4	4	4	4	4
Correlação de Pearson	0,767596		-0,44467		0,90889		-0,83786	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0	
gl	3		3		3		3	
Stat t	-3,07946		-0,16523		2,65842		-2,8447	
P(T<=t) uni-caudal	0,027079		0,439634		0,038221		0,032697	
t crítico uni-caudal	2,353363		2,353363		2,353363		2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,054159		0,879267		0,076442		0,065393	
t crítico bi-caudal	3,182446		3,182446		3,182446		3,182446	

APÊNDICE L - TEOR DE ARGAMASSA ADERIDA

Apêndice L.1 - Tabela de resultados individuais de teor de argamassa aderida na fração pedrisco

PEDRISCO	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Teor de pasta	Média
ICA1	500,00	156,10	69%	64%
ICA2	500,91	204,66	59%	
MCA1	500,00	141,27	72%	72%
MCA2	500,00	142,55	71%	
IMA1	500,52	201,87	60%	60%
IMA2	500,50	199,15	60%	
MMA1	500,32	172,67	65%	66%
MMA2	500,35	171,08	66%	
ICB1	500,17	251,74	50%	53%
ICB2	500,13	219,73	56%	
MCB1	500,01	142,81	71%	75%
MCB2	500,20	105,98	79%	
IMB1	500,30	141,04	72%	72%
IMB2	500,34	142,82	71%	
MMB1	500,00	213,93	57%	59%
MMB2	500,16	196,05	61%	

Apêndice L.2 - Tabela de resultados individuais de teor de argamassa aderida na fração brita

BRITA	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Teor de pasta	Média
ICA1	500,00	139,72	72%	69%
ICA2	500,03	167,89	66%	
MCA1	500,00	208,03	58%	61%
MCA2	500,00	184,48	63%	
IMA1	500,71	210,58	58%	56%
IMA2	500,11	224,92	55%	
MMA1	500,48	198,10	60%	51%
MMA2	500,80	290,94	42%	
ICB1	500,97	215,75	57%	52%
ICB2	500,30	266,87	47%	
MCB1	500,78	134,03	73%	67%
MCB2	500,31	196,85	61%	
IMB1	500,09	274,40	45%	49%
IMB2	500,18	234,92	53%	
MMB1	500,00	216,78	57%	53%
MMB2	500,50	251,11	50%	

Apêndice L.3 - Tabela de resultados individuais de teor de argamassa aderida na fração rachão

RACHÃO	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Teor de pasta	Média
ICA1	1002,43	710,28	29%	43%
ICA2	1003,01	440,61	56%	
MCA1	1000,00	250,64	75%	71%
MCA2	1008,24	337,48	67%	
IMA1	1004,14	222,27	78%	68%
IMA2	1001,59	409,66	59%	
MMA1	1004,23	373,33	63%	68%
MMA2	1006,82	265,05	74%	
ICB1	1004,74	431,94	57%	61%
ICB2	1000,52	341,76	66%	
MCB1	1005,50	308,42	69%	65%
MCB2	1007,03	399,11	60%	
IMB1	1017,66	379,09	63%	62%
IMB2	1006,33	381,19	62%	
MMB1	1005,22	246,87	75%	65%
MMB2	1042,00	468,18	55%	