

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL PEREIRA MARINHO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS RECICLADOS PRODUZIDOS EM  
BRITADORES DE MANDÍBULA E DE IMPACTO NAS PROPRIEDADES DE  
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

CURITIBA

2016

GABRIEL PEREIRA MARINHO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS RECICLADOS PRODUZIDOS EM  
BRITADORES DE MANDÍBULA E DE IMPACTO NAS PROPRIEDADES DE  
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

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

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

CURITIBA

2016

Marinho, Gabriel Pereira

Avaliação da influência dos agregados reciclados produzidos em britadores de mandíbula e de impacto nas propriedades de argamassas de revestimento / Gabriel Pereira Marinho. – Curitiba, 2016.

119 f. : il.; tabs.

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

Orientador: Leonardo F. R. Miranda

Bibliografia: p. 85-91

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

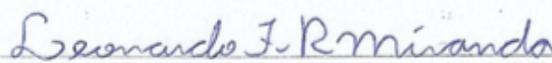
CDD 622.3382

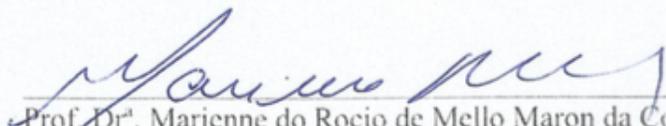
## TERMO DE APROVAÇÃO

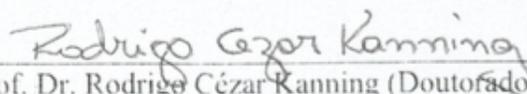
GABRIEL PEREIRA MARINHO

### AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS RECICLADOS PRODUZIDOS EM BRITADORES DE MANDÍBULA E DE IMPACTO NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

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. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa (Doutorado USP-SP)  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.

  
Prof. Dr. Rodrigo César Kanning (Doutorado UFPR-PR)  
Instituto Federal do Paraná - IFPR

Curitiba, 31 de maio de 2016

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus que me deu forças para concluir mais essa conquista.

À minha esposa, Elaine, que enfrentou todas as dificuldades no trajeto até aqui ao meu lado.

Ao meu orientador, Prof. Leonardo F. R. Miranda, pelo acompanhamento, ensinamento e pelo esforço realizado para coleta das amostras.

Aos técnicos dos laboratórios de materiais e estruturas da UFPR, Douglas e Ricardo, pela atenção cedida para auxílio nos ensaios e armazenamento das amostras.

À usina URBEM pelo fornecimento de RCD e britagem no britador de impacto e à usina PROGUARU pela britagem no britador de mandíbula.

Ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) pelo recurso financeiro para o desenvolvimento dessa dissertação.

MARINHO, G. P. **Avaliação da influência dos agregados reciclados produzidos em britadores de mandíbula e de impacto nas propriedades das argamassas de revestimento.** Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

## RESUMO

Devido ao elevado volume de resíduos gerados nos processos de construção e demolição (RCD), a reciclagem tem se mostrado como uma alternativa de alta relevância. Entre as possibilidades de aplicação do agregado reciclado constam as argamassas utilizadas em revestimento de alvenaria. No Brasil é comum o uso de britadores de mandíbula e de impacto na produção de areia reciclada. Entretanto, há pouco conhecimento sobre a influência do uso destes equipamentos nas propriedades físicas dos agregados, tampouco sobre o desempenho das argamassas. Tendo em vista isto, o objetivo deste trabalho reside na avaliação da influência dos agregados reciclados produzidos em britadores de mandíbula e impacto nas propriedades de argamassas de revestimento. Para esta finalidade, foram coletadas duas amostras de RCD de origens mista e de concreto que, posteriormente, foram britadas nos equipamentos das usinas de reciclagem URBEM e PROGUARU, ambas atuantes no Estado de São Paulo. As areias recicladas foram caracterizadas quanto às seguintes propriedades: composição granulométrica, determinação do teor de finos  $< 75 \mu\text{m}$ , massa unitária e específica, absorção de água e microscopia eletrônica de varredura (MEV), sendo esta última associada ao índice de forma do agregado. As argamassas produzidas foram caracterizadas quanto à consistência, densidade de massa fresca, consumo de cimento por  $\text{m}^3$ , resistência à tração e à compressão, retração por secagem e densidade de massa endurecida. Como resultado, o britador de mandíbula apresentou concentração maior de grãos nas peneiras superiores que o de impacto, assim como os de origem de concreto quando comparados com os de origem mista. Por consequência, o britador de impacto gerou maior teor de material passante na peneira  $75 \mu\text{m}$ . Para as argamassas contabilizou-se também o teor de finos  $< 75 \mu\text{m}$  do cimento, determinando assim o teor total de material  $< 75 \mu\text{m}$  da argamassa. O britador de mandíbula produziu todas as amostras abaixo ou igual à recomendada por Miranda et al. (2013) que é de, no máximo 23%, já o de impacto apenas uma argamassa ficou abaixo deste limite. A resistência mecânica foi maior ou igual para o britador de mandíbula, seja de tração na flexão ou na compressão em virtude de relação a/c, absorção e teor total de finos  $< 75 \mu\text{m}$ . Com isto, ao contrário do que normalmente é recomendado pelo meio técnico, recomenda-se o uso do britador de mandíbula para a produção de areias usadas em argamassas de revestimento, por gerarem argamassas com teor total de finos  $< 75 \mu\text{m}$  dentro do limite recomendado e por resultarem em argamassas com resistências mecânicas superiores aquelas produzidas com areias oriundas do britador de impacto. Adicionalmente, propõem-se uma primeira estimativa de correlação linear múltipla entre a resistência à compressão da argamassa e propriedades dos agregados reciclados.

**Palavras-chaves:** agregado reciclado, britador de impacto, britador de mandíbula, argamassa, reciclagem, resíduo de construção e demolição.

MARINHO, G. P. **Evaluation of the influence of the recycled aggregates produced by jaw crusher and impact crusher on properties of coating mortars.** Master's dissertation, Civil Engineering, Federal University of Paraná, Curitiba, 2016.

## ABSTRACT

Due to elevated amount of construction and demolition waste (CDW) the recycling is one of the solutions to this problem. Among the possibilities of application of the recycled aggregate are the plastering mortars. In Brazil it is common the use of jaw crusher and impact crusher in the production of recycled sand. However, there is little knowledge about the influence of these equipments either in the physical properties of the aggregates or in the performance of mortars. Therefore, the objective of this work is to evaluate the influence of the recycled aggregates produced in jaw crusher and impact crusher in the properties of the plastering mortars. Thus, they were collected two samples of CDW from mixed and concrete wastes which were posteriorly crushed in URBEM and PROGARU recycling plants, both acting in the state of São Paulo. The recycled sands were characterized regarding to the following properties: grain size distribution, material finer than 75  $\mu\text{m}$ , unit weight and bulk specific gravity, water absorption and scanning electron microscope (SEM), the last one being associated to the form index of the aggregate. The produced mortars were characterized regarding consistency, fresh mortar density, cement consumption per  $\text{m}^3$ , tensile strength and compressive strength, drying shrinkage and hardened mortar density. As result, the jaw crusher presented thicker curves than the impact crusher, so as the ones from concrete when compared with the ones from mixed waste. By consequence, the impact crusher generated higher content of fines < 75  $\mu\text{m}$ . For the mortars it was accounted as well the material finer than 75  $\mu\text{m}$  of the cement, determining the total material finer than 75  $\mu\text{m}$  of mortar. The jaw crusher produced all the samples inferior or equal to the recommended by Miranda (2013) which the maximum is 23%; the impact crusher produced only one mortar which was inferior of this limit. The mechanic resistance was superior or equal to the jaw crusher, either in tensile strength or in compressive strength because of the ratio w/c, absorption and total material finer than 75  $\mu\text{m}$ . Thereby, in the contrary of what is commonly recommended, it is recommended the use of the jaw crusher to the production of sands used in plastering because of this crusher to generate total material finer than 75  $\mu\text{m}$  in mortars within recommended limit and by resulting in mortars with superior mechanical resistance comparing to those produced with sands originated from impact crusher. In addition, it is proposed a primary estimative of multiple linear correlation between compressive strength of the mortar and the properties of the recycled aggregate.

**Keywords:** recycled aggregates, jaw crusher, impact crusher, mortars, recycling, construction and demolition wasted.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – TOTAL DE RCD COLETADOS BRASIL E REGIÕES (Tonelada x 1000/ano) ..	15
FIGURA 2 – CONCENTRAÇÃO DE USINAS NOS ESTADOS .....	16
FIGURA 3 – EXEMPLO DE COMPOSIÇÃO DO RCD NO BRASIL .....	19
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DA USINA DE RECICLAGEM DA FRAÇÃO MINERAL DO RCD DE VINHEDO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL .....	21
FIGURA 5 – PARTÍCULAS DE ACORDO COM O TIPO DE MECANISMO DE FRAGMENTAÇÃO.....	23
FIGURA 6 – BRITADOR DE MANDÍBULA .....	25
FIGURA 7 – BRITADOR DE IMPACTO .....	26
FIGURA 8 – ESTRUTURA DO AGREGADO RECICLADO NA MATRIZ DE CIMENTO ...	28
FIGURA 9 – CORRELAÇÃO ENTRE A ABSORÇÃO DE ÁGUA E A MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA FRAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO E AGREGADOS RECICLADOS MISTOS.....	30
FIGURA 10 – CORRELAÇÃO ENTRE A ABSORÇÃO DE ÁGUA E A MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA FRAÇÃO MIÚDA DOS AGREGADOS RECICLADOS MISTOS .....	30
FIGURA 11 – FATORES QUE EXERCEM INFLUÊNCIA NA ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS SOBRE BASES POROSAS .....	37
FIGURA 12 – FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	41
FIGURA 13 – USINA DE RECICLAGEM PROGRARU .....	42
FIGURA 14 – USINA DE RECICLAGEM URBEM.....	42
FIGURA 15 – COLETA MANUAL DO MATERIAL DE CONCRETO NA URBEM.....	43
FIGURA 16 – COLETA DO MATERIAL DE CONCRETO POR PÁ CARREGADEIRA PARA BRITAGEM NA URBEM.....	43
FIGURA 17 – COLETA DO MATERIAL BRITADO NA CORREIA TRANSPORTADORA NA URBEM.....	44
FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DA AMOSTRAGEM DO MATERIAL.....	45
FIGURA 19 – PILHAS LONGAS DE HOMOGENEIZAÇÃO .....	45
FIGURA 20 – REDUÇÃO DA AMOSTRA .....	46

FIGURA 21 – REDUTOR DE AMOSTRAS TIPO JONES.....	46
FIGURA 22 – AMOSTRAS PARA MEV .....	47
FIGURA 23 – EQUIPAMENTO DE MEV.....	48
FIGURA 24 – MEV ESCALA 2 mm AMOSTRA IMA.....	48
FIGURA 25 – SATURAÇÃO A VÁCUO.....	50
FIGURA 26 – CONJUNTO PARA ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR MICRO-ONDAS: COMPUTADOR, BALANÇA DIGITAL, MICRO-ONDAS PERFURADO NA PARTE SUPERIOR.....	51
FIGURA 27 – GRÁFICO BASE PARA DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO NO <i>ORIGIN</i> .....	52
FIGURA 28 – ARGAMASSADEIRA .....	54
FIGURA 29 – CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA NA MESA DE CONSISTÊNCIA.....	55
FIGURA 30 – (A) FORMA PARA CORPOS DE PROVAS 4 x 4 x 16. (B) CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	56
FIGURA 31 – (A) PRENSA EMIC ROMPIMENTO À TRAÇÃO NA FLEXÃO. (B) ROMPIMENTO À COMPRESSÃO .....	56
FIGURA 32 – (A) FORMAS PARA CORPOS DE PROVA DE RETRAÇÃO. (B) CORPOS DE PROVA DE RETRAÇÃO DE SECAGEM.....	57
FIGURA 33 – (A) CALIBRAÇÃO PARA MEDIÇÃO. (B) MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO DE SECAGEM.....	57
FIGURA 34 – MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA DE ABERTURA 4,8 mm PARA CADA AMOSTRA, SEPARADAS POR BRITADORES .....	59
FIGURA 35 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA PASSANTE ACUMULADA DAS AMOSTRAS DE AGREGADO MIÚDO.....	60
FIGURA 36 – ARREDONDAMENTO DE CADA AMOSTRA .....	61
FIGURA 37 – ESFERICIDADE DE CADA AMOSTRA.....	62
FIGURA 38 – ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS MIÚDOS .....	63
FIGURA 39 – TEOR DE FINOS < 75 $\mu\text{m}$ DAS AMOSTRAS.....	64
FIGURA 40 – ABSORÇÃO DAS AMOSTRAS E MASSA ESPECÍFICA APARENTE .....	65
FIGURA 41 – ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75 $\mu\text{m}$ .....	66

FIGURA 42 – RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA DAS AMOSTRAS .....	66
FIGURA 43 – RESULTADOS DE MASSA UNITÁRIA .....	67
FIGURA 44 – ÍNDICE DE VAZIOS DAS AMOSTRAS .....	68
FIGURA 45 – RESULTADOS DOS TEORES TOTAIS DE FINOS < 75 µm.....	70
FIGURA 46 – DENSIDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	71
FIGURA 47 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO NAS AMOSTRAS .....	72
FIGURA 48 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO EM FUNÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	72
FIGURA 49 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	73
FIGURA 50 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS OITO AMOSTRAS .....	74
FIGURA 51 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO A/C.....	74
FIGURA 52 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	75
FIGURA 53 – RETRAÇÃO POR SECAGEM EM FUNÇÃO DA IDADE ATÉ OS 28 DIAS ..	76
FIGURA 54 – RETRAÇÃO POR SECAGEM AOS 28 DIAS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO A/C .....	76
FIGURA 55 – RETRAÇÃO POR SECAGEM AOS 28 DIAS EM FUNÇÃO DO TOTAL DE MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75 µm.....	77

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EXIGÊNCIAS PARA OS AGREGADOS RECICLADOS DESTINADOS A PRODUÇÃO DE CONCRETO NÃO-ESTRUTURAL.....	32
TABELA 2 – REQUISITOS DE AGREGADOS PARA ARGAMASSA.....	33
TABELA 3 – SUBDIVISÃO DAS AMOSTRAS.....	44
TABELA 4 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	47
TABELA 5 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	53
TABELA 6 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MECÂNICA DO CIMENTO PORTLAND CP II F – 32.....	53
TABELA 7 – TRAÇO, ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA, CONSUMO DE CIMENTO E TOTAL DE FINOS < 75 µm DAS ARGAMASSAS.....	55
TABELA 8 – RESUMO DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	58
TABELA 9 – MÓDULO DE FINURA DAS AREIAS.....	60
TABELA 10 – DENSIDADE NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS.....	69
TABELA 11– RESUMO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO .....	70
TABELA 12 – REGRESSÃO LINEAR – <i>RESIDUALS</i> .....	78
TABELA 13 – REGRESSÃO LINEAR – <i>COEFFICIENTS</i> .....	78
TABELA 14 – 1º TESTE DE <i>BONFERRONI</i> PARA <i>OUTLIERS</i> .....	78
TABELA 15 – REGRESSÃO LINEAR – <i>RESIDUALS</i> .....	79
TABELA 16 – REGRESSÃO LINEAR – <i>COEFFICIENTS</i> .....	79
TABELA 17 – CORRELAÇÃO <i>PARTIAL CORRELATIONS</i> .....	80
TABELA 18 – CORREÇÃO DE <i>SPEARMAN</i> .....	80
TABELA 19 – AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL .....	80
TABELA 20 – TESTE DE SELEÇÃO DO MODELO.....	81
TABELA 21 – TESTE DE SELEÇÃO DO MODELO – <i>COEFFICIENTS</i> .....	81
TABELA 22 – RESULTADO FINAL E INTERVALOS DE CONFIANÇA.....	81
TABELA 23 – RESULTADO CALCULADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	82

## **LISTA DE SIGLAS**

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

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

## **LISTA DE ABREVIACÕES**

MCA – Amostra processada no britador de mandíbula com origem de concreto do lote A

MMA – Amostra processada no britador de mandíbula com origem mista do lote A

ICA – Amostra processada no britador de impacto com origem de concreto do lote A

IMA – Amostra processada no britador de impacto com origem mista do lote A

MCB – Amostra processada no britador de mandíbula com origem de concreto do lote B

MMB – Amostra processada no britador de mandíbula com origem mista do lote B

ICB – Amostra processada no britador de impacto com origem de concreto do lote B

IMB – Amostra processada no britador de impacto com origem mista do lote B

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1. IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	15
1.2. OBJETIVO.....	17
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>19</b>
2.1. GERAÇÃO E APLICAÇÃO DE RCD .....	19
2.2. BRITADORES .....	22
2.2.1. Britador de mandíbula.....	24
2.2.2. Britador de impacto.....	26
2.3. CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS .....	27
2.3.1. Morfologia das partículas .....	27
2.3.2. Teor de argamassa aderida.....	28
2.3.3. Absorção de água e porosidade.....	29
2.4. ARGAMASSAS COM AGREGADOS RECICLADOS .....	31
2.4.1. Propriedades no estado fresco.....	33
2.4.1.1. Trabalhabilidade .....	33
2.4.1.2. Teor de finos < 75 µm e fissuração.....	34
2.4.2. Propriedades no estado endurecido.....	36
2.4.2.1. Aderência.....	36
2.4.2.2. Resistência mecânica .....	38
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>40</b>
3.1. OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE RCD .....	42
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS .....	47
3.2.1. Microscopia Eletrônica de Varredura .....	47
3.2.2. Absorção do agregado miúdo no micro-ondas .....	50
3.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	52
3.3.1. Materiais utilizados.....	53
3.3.2. Método de mistura .....	54
3.3.3. Método de dosagem .....	55

3.3.4. Resistência à tração na flexão e na compressão e densidade de massa endurecida.....	56
3.3.5. Retração de secagem.....	57
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>58</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	58
4.1.1. Curvas granulométricas .....	58
4.1.2. Forma dos grãos.....	61
4.1.3. Teor de finos < 75 $\mu\text{m}$ e absorção de água .....	63
4.1.4. Massa específica, massa unitária e índice de vazios.....	66
4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO .....	68
4.2.1. Teor total de finos < 75 $\mu\text{m}$ .....	69
4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO .....	70
4.3.1. Densidade da argamassa no estado endurecido .....	70
4.3.2. Resistência à tração na flexão.....	71
4.3.3. Resistência à compressão.....	73
4.3.4. Retração por secagem .....	75
4.4. ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA DOS RESULTADOS.....	77
4.4.1. Teste de <i>Bonferroni</i> para <i>Outliers</i> .....	78
4.4.2. Teste de normalidade <i>Shapiro-Wilk</i> .....	79
4.4.3. Teste de <i>Durbin-Watson</i> .....	80
4.4.4. Intervalos de confiança e equação da regressão linear múltipla.....	81
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE A – RESULTADOS FORMA DOS GRÃOS.....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DE ARREDONDAMENTO, ESFERICIDADE E ÍNDICE DE FORMA.....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE C – RESULTADOS DE MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75 <math>\mu\text{m}</math>.....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS DE ABSORÇÃO NO MICRO-ONDAS.....</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE E – RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE F – RESULTADOS DE MASSA UNITÁRIA .....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE G – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO .....</b>	<b>115</b>

## 1. INTRODUÇÃO

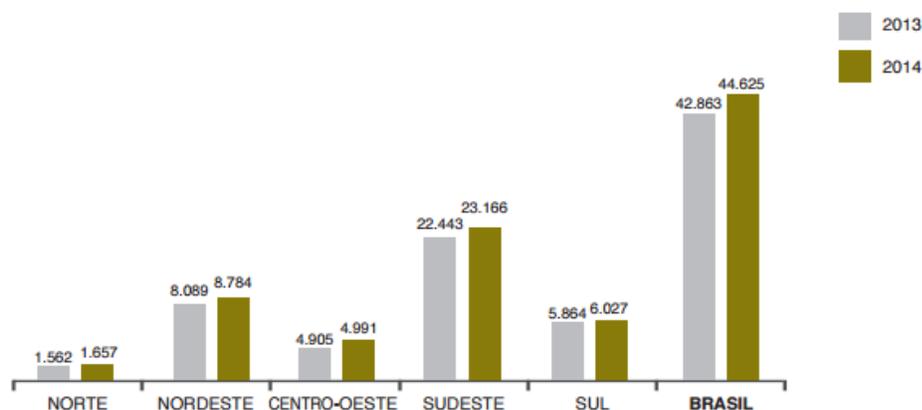
### 1.1. IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O gerenciamento dos resíduos de construção civil é uma preocupação ambiental de responsabilidade dos poderes governamentais, seja na construção de aterros, coleta do RCD (resíduo de construção e demolição), na política de reutilização, incentivo para o desenvolvimento de novas tecnologias de reaproveitamento, como já acontece no Brasil e em outros países emergentes.

Na União Europeia, por exemplo, os resíduos de demolição chegam a 180 milhões toneladas por ano. Cerca de 75% dos resíduos estão dispostos em aterro, apesar do seu grande potencial de reciclagem. A viabilidade técnica e econômica da reciclagem tem sido comprovada, permitindo, alguns países como Dinamarca, Países Baixos e Bélgica, alcançar taxas superiores a 80% de reciclagem (CORINALDESI; MORICONI, 2008).

No Brasil os municípios coletaram cerca de 45 milhões de toneladas de RCD em 2014, o que implica no aumento de 4,1% em relação a 2013 (FIGURA 1). Esta situação, também observada em anos anteriores, exige atenção especial quanto ao destino final deste material, visto que a quantidade total dos resíduos é ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos (MIRANDA, 2014). O RCD coletado pode ser destinado em aterros públicos, usinas públicas ou privadas.

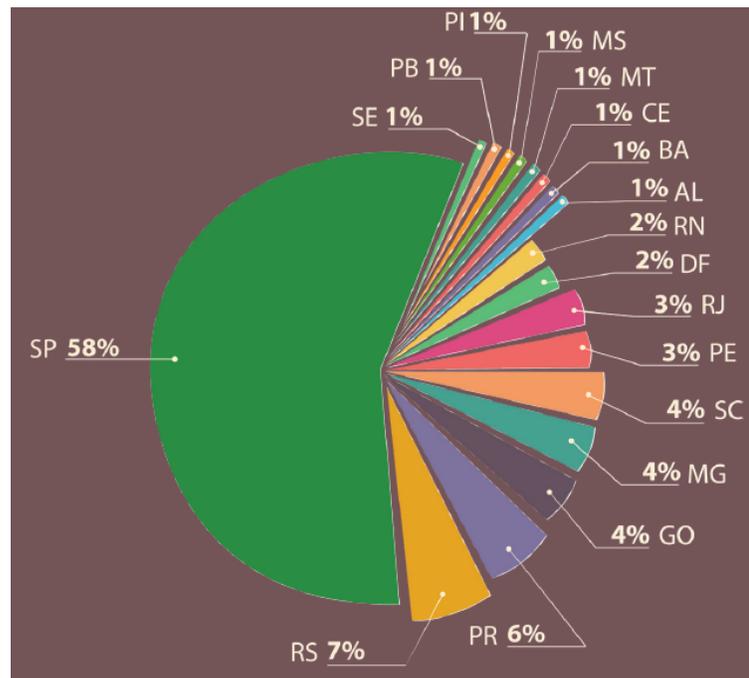
FIGURA 1 – TOTAL DE RCD COLETADOS BRASIL E REGIÕES (Tonelada x 1000/ano)



Fonte: ABRELPE (2014).

Dados sobre a situação de reciclagem no Brasil indicam que existem em todo o país mais de 310 empresas ligadas, de alguma forma, aos RCD (aterros de inertes, áreas de transbordo e triagem e usinas de reciclagem). A concentração das usinas está apresentada na FIGURA 2, considerando 112 usinas que participaram da pesquisa setorial 2013 (ABRECON, 2013). Depois da etapa de reciclagem, a utilização do material beneficiado pode ter diversos usos, dependendo do mercado local, controle tecnológico e sua origem.

FIGURA 2 – CONCENTRAÇÃO DE USINAS NOS ESTADOS



FONTE: ABRECON (2013).

O agregado obtido no processo de reciclagem nas usinas pode ser aplicado em serviços de pavimentação, na fabricação de argamassas de assentamento e revestimento, na fabricação de concretos não estruturais e pré-moldados (como blocos, peças de meio-fio e outros). No entanto, já se têm registros de países onde o agregado reciclado é aplicado na fabricação de concretos estruturais (HANSEN, 2005; CARNEIRO et al., 2001; MIRANDA, 2005).

Em alguns países em desenvolvimento, mais utilizações foram encontradas para o RCD, e uma delas baseia-se na produção de areia reciclada para argamassas sem função estrutural, tais como argamassas para assentamento ou revestimento de alvenarias e contrapisos (MIRANDA; SELMO, 2006). O uso do agregado miúdo reciclado é de suma significância para a gestão de resíduos sólidos da construção civil. Isto porque o consumo de agregado miúdo em uma argamassa

de revestimento é representativo, chegando a  $0,137 \text{ m}^3/\text{m}^2$  de obra (LICHTENSTEIN, 1986), valorizando o consumo de materiais reciclados e reduzindo o uso de agregados naturais. Como um exemplo, Miranda (2000) produziu uma argamassa com areia reciclada que chegou a custar apenas 40% do preço do  $\text{m}^3$  de argamassa mista de traço 1:1:8 em massa. Esse material está sujeito a sofrer influência se for de origem mista ou de concreto, assim como do processo de britagem utilizado.

Em relação aos tipos de equipamentos de britagem, das 112 usinas entrevistadas na pesquisa setorial de ABRECON (2013), 49% usam britadores de mandíbula e 29% de impacto. Apesar do maior uso de britadores de mandíbulas pelo seu menor custo e manutenção, a recomendação é do uso do britador de impacto, pois afirma-se que ele produz agregados reciclados de maior qualidade e ocorrem menos pausas na produção quando se tem presença de RCD misto e úmido. Ainda se referindo ao britador de impacto, este gera agregados com forma mais cúbica, sendo aconselhável sua utilização para materiais com tendência a produzir partículas mais lamelares (LUZ et al., 1998).

Os britadores de impacto e de mandíbula possuem influência nos agregados gerados, variando na forma e na porosidade das partículas, porém não existem trabalhos relacionando tais influências com as propriedades das argamassas produzidas com eles. Desta forma, não se conhece a verdadeira importância de serem utilizados britadores de impacto para melhoria da qualidade dos agregados reciclados.

Sendo assim, este trabalho se mostra importante, uma vez que se propõe a definir a influência do britador de impacto e de mandíbula nas propriedades dos agregados e das argamassas de revestimento.

## 1.2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência dos agregados reciclados produzidos em britadores de mandíbula e de impacto em usinas de reciclagem nas propriedades de argamassas de revestimento.

## 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A comparação entre os equipamentos de britagem (britador de mandíbula e britador de impacto) de resíduos da construção civil fundamenta a finalidade dessa pesquisa e adequa-se à proposição de Yin (2001), onde para o estudo de caso não se tem muito controle do pesquisador

sobre os eventos, o foco dos estudos encontra-se em fenômenos contemporâneos contidos em algum quadro da vida real. Também se pode dizer que a estratégia induz aos seguintes questionamentos do tipo “Como?” e “Por quê?” do item estudado. Dessa maneira, como e por que os tipos de britadores (mandíbula e impacto) podem ter influência nas propriedades dos agregados e conseqüentemente alterar ou não as propriedades de argamassas de revestimento produzidas com esses agregados.

E a estruturação dessa dissertação se divide em 5 capítulos, sendo eles:

- Capítulo 1: Introdução enfatizando a importância do trabalho, apresentando dados referentes ao tema e o objetivo da pesquisa.
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre caracterização dos agregados reciclados e propriedades das argamassas de revestimento.
- Capítulo 3: Descrição do programa experimental assim como o detalhamento dos procedimentos de ensaios.
- Capítulo 4: Apresentação e análise comparativa dos resultados obtidos nos ensaios.
- Capítulo 5: Discussão e conclusão sobre os resultados coletados durante a pesquisa e propostas de estudos futuros.

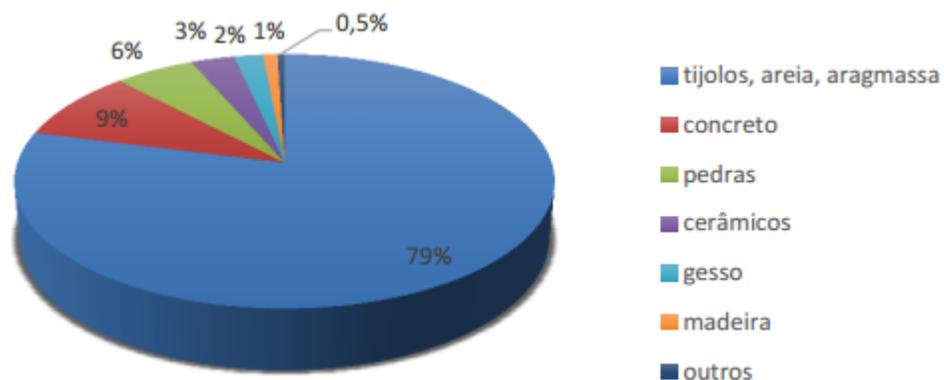
## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1. GERAÇÃO E APLICAÇÃO DE RCD

Os resíduos de construção são gerados nas atividades de demolição, reforma e construção e constituídos por um conjunto de materiais, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, madeiras e compensados, argamassa, gesso, entre outros (CONAMA, 2002). Pela Resolução 307 do CONAMA (2002) e suas alterações, esses resíduos são classificados em quatro classes, a saber: Classe A, resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados; Classe B, resíduos recicláveis para outras destinações como plásticos, papel/papelão, metais, gesso, lata de tinta entre outros; Classe C, resíduos sem tecnologia disponível para reciclagem e aproveitamento e; Classe D, resíduos perigosos como tintas, solventes, óleos, fibrocimentos com amianto, entre outros.

De forma geral, a composição dos resíduos de construção e demolição tem uma parcela expressiva de materiais inorgânicos e uma parcela menor de orgânicos. Sua reciclagem refere-se usualmente à fração mineral do resíduo, composta por materiais de construção, como concreto, argamassas, cerâmicas e rochas. A caracterização da composição do resíduo depende essencialmente da natureza dos processos construtivos e, conseqüentemente, dos materiais empregados. No Brasil, a origem principal é a mista (concreto e alvenaria), assim como em muitos países europeus (ULSEN, 2011). Os resíduos mistos são na maioria constituídos por tijolos, areias e argamassas, como apresentado na FIGURA 3 (LUCENA, 2005).

FIGURA 3 – EXEMPLO DE COMPOSIÇÃO DO RCD NO BRASIL



FONTE: LUCENA (2005).

Após a geração e identificação de material a ser reciclado, é feita sua coleta e posteriormente seu transporte até uma usina de reciclagem, geralmente localizada em zonas industriais ou mais afastada das cidades para que se possa ser feito o processo de britagem.

A localização de usinas gera algumas desvantagens quanto ao local de sua implantação, bem como a reciclagem feita em obra, como ruídos e poeira (HANSEN, 2005).

Como vantagens da reciclagem têm-se o aumento da vida útil de jazidas de matérias-primas não renováveis, diminuição da extração ilegal de areia e das deposições ilegais de resíduos e aumento da vida útil dos aterros de inertes (ULSEN, 2011).

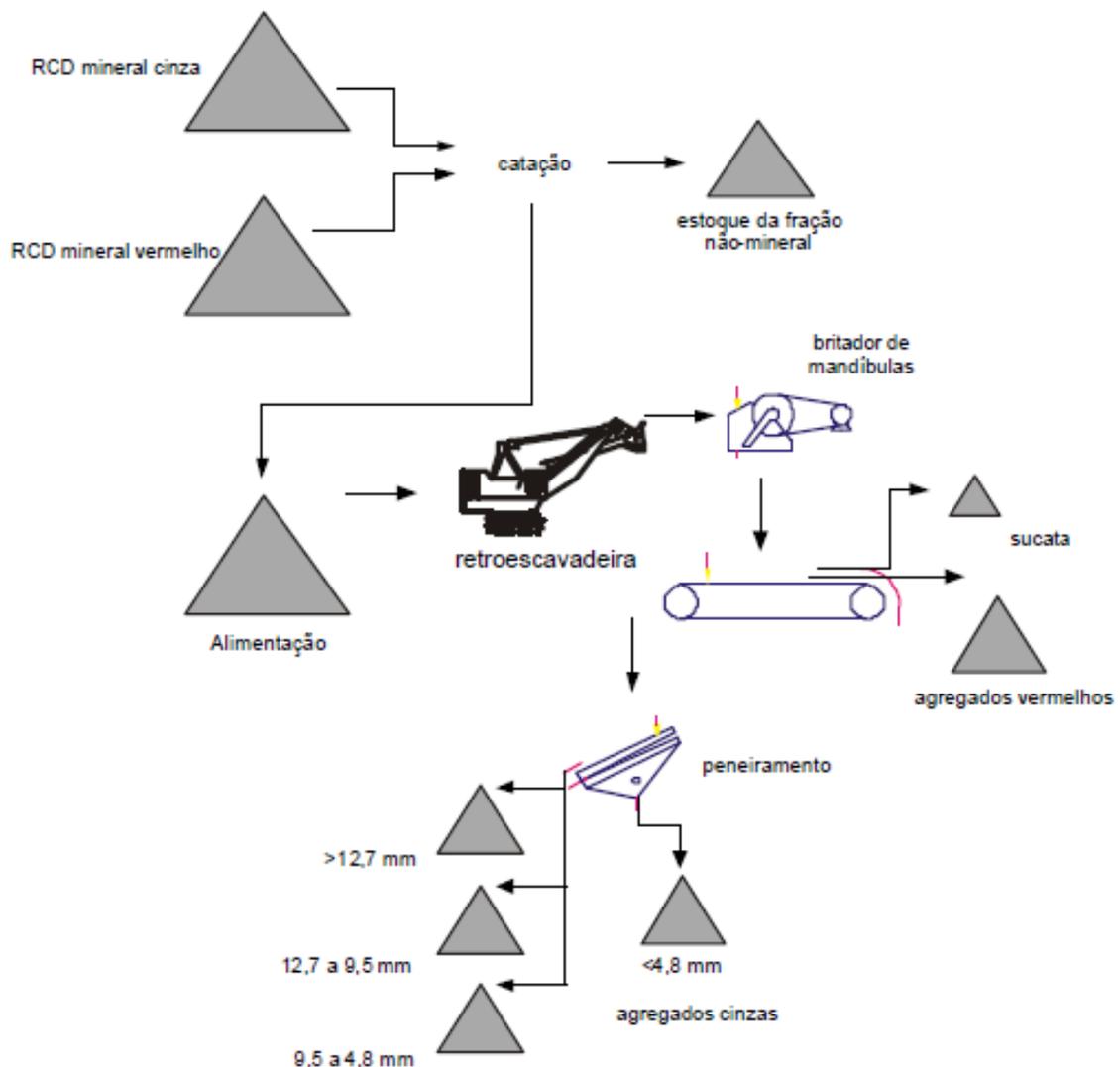
Ainda sobre a redução do consumo de matérias-primas não renováveis têm-se como exemplos algumas empresas e prefeituras com iniciativas visando a reciclagem do RCD, como o caso de Belo Horizonte que faz o uso de agregado reciclado em pavimentação, desde 1994. Em 2005, também a Prefeitura de São Bernardo do Campo consumiu cerca de 4.800 m<sup>3</sup> de agregado reciclado do tipo bica corrida para a manutenção de ruas não pavimentadas. Para o mesmo tipo de uso e na mesma época, a Prefeitura de Mauá consumiu cerca de 4.000 m<sup>3</sup>. Ambas as obras foram realizadas com êxito. Ainda em 2005, a sub-base do Campus Zona Leste da USP, em São Paulo, foi realizada com agregados reciclados (MIRANDA et al., 2009).

Em relação ao processo de britagem utilizado nas usinas de reciclagem, Miranda et al. (2009) apontam que quase todas empregam processos semelhantes (FIGURA 4), possuindo os equipamentos: pá carregadeira, escavadeira ou retroescavadeira para o transporte do material, alimentador vibratório para a introdução do resíduo no sistema de britagem, transportador de correia para o transporte entre equipamentos da usina, britador de impacto ou mandíbula para a cominuição do resíduo, separador magnético para a retirada de materiais ferrosos e peneira vibratória a distribuição granulométrica do produto final.

Um investimento em usinas de reciclagem, que utilizam processo semelhante ao acima citado, feito por setor público, ter-se-ia uma amortização entre 1 e 2 anos dos custos empregados em sua implantação, uma vez que haveria a eliminação dos custos com a limpeza urbana do RCD e com a aquisição de agregados naturais, pois esses seriam substituídos pelos agregados reciclados produzidos pela usina. Dados da usina de reciclagem Estoril, em Belo Horizonte, apontam que os investimentos realizados haviam sido amortizados apenas nos primeiros 6,3 meses de funcionamento, considerando-se somente a substituição de agregados naturais por reciclados e a eliminação do processo de limpeza urbana. Similarmente, na usina de Ribeirão Preto, o resultado

acumulado em 32 meses de operação apontava que o valor investido em equipamentos já havia sido amortizado 2,5 vezes (PINTO, 1999). A cidade de São José dos Campos obteve amortização dos custos de implantação em 36 meses, com produção projetada de 30 toneladas/hora (CORRÊA; CURSINO; SILVA, 2009).

FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DA USINA DE RECICLAGEM DA FRAÇÃO MINERAL DO RCD DE VINHEDO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL



FONTE: ANGULO (2005).

Para a iniciativa privada o investimento em usinas de reciclagens depende dos seguintes fatores: valor a ser cobrado pelo recebimento do RCD; origem e qualidade do produto gerado; possibilidade de consumo e venda do material no mercado; análise de materiais concorrentes e

localização da usina. Como vantagens para esse setor têm-se uma taxa interna de retorno prevista de 2,8% a.m. e *payback* em torno de 35 meses (ABRECON, 2014).

O dimensionamento de equipamentos de britagem para o processo de reciclagem envolve custos também, portanto é importante que o britador não seja escolhido somente pela sua capacidade de produção horária, mas também pela dimensão máxima do RCD na entrada do processo, assim como condições de projeto, análise do mercado e das vantagens de cada um (MIRANDA, 2005).

Como o foco desta pesquisa está na avaliação dos britadores de impacto e mandíbula, serão apresentadas nos próximos itens as principais diferenças destes dois equipamentos e resultados encontrados por outros autores quanto às características dos agregados oriundos desses equipamentos.

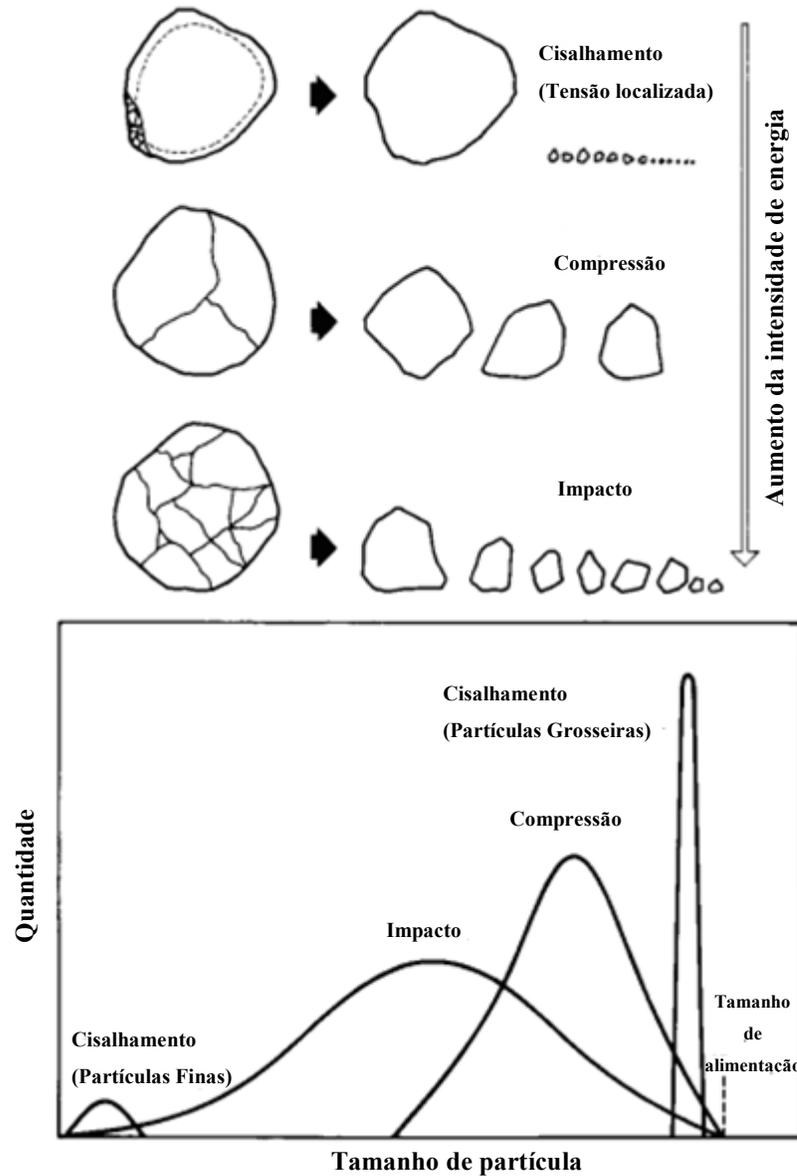
## 2.2. BRITADORES

Os britadores são equipamentos usados para cominuição de materiais sólidos, como rochas, carvão, vidro, e são empregados em segmentos da indústria como a mineração e reciclagem de resíduos de construção, tendo o poder de modificar a morfologia das partículas.

No caso de rochas, as partículas constituem-se em fragmentos formados por minerais que são materiais cristalinos, em que átomos se configuram em arranjos tridimensionais. A configuração da estrutura cristalina é fortemente determinada pelo tipo de ligações químicas entre os átomos, íons e moléculas constituintes, bem como de suas valências e tamanhos. Em pequenas distâncias, as ligações interatômicas são intensas, e podem ser quebradas com a aplicação de esforços externos (LUZ et al., 1998).

Para a realização do esforço que rompe as ligações interatômicas do agregado, os equipamentos de britagem e moagem utilizam diferentes mecanismos. Os principais mecanismos de fragmentação são o de compressão, de impacto e de abrasão por cisalhamento (GALERY, 2011). Na FIGURA 5 pode se notar a diferença de fragmentação entre os mecanismos segundo o aumento de energia e também a variação de tamanho por quantidade.

FIGURA 5 – PARTÍCULAS DE ACORDO COM O TIPO DE MECANISMO DE FRAGMENTAÇÃO



FONTE: GALERY (2011).

O mecanismo de compressão consiste na quebra devido às forças de compressão, de baixa intensidade, quando aplicadas de maneira lenta e progressiva, que causa o aparecimento da fratura. As forças de compressão aplicadas são pouco superiores à resistência dos blocos rochosos ou partículas. O efeito deste mecanismo é um número reduzido de fragmentos homogêneos de tamanho intermediário. É o mecanismo mais comum e ocorre principalmente em britadores de mandíbulas, britadores giratórios e cônicos (GALERY, 2011).

Na fragmentação através do impacto, a fratura acontece quando forças são aplicadas rapidamente e em proporção muito superior à resistência das partículas. Usa-se energia cinética de corpos em movimentos circulares ou cadenciado. A consequência deste tipo de quebra é uma ampla faixa granulométrica com um grande número de partículas. Em utilização de energia este é o mecanismo mais eficiente, entretanto, apresenta restrição em sua aplicação para materiais menos abrasivos (VALADÃO, 2007).

Na abrasão por cisalhamento as forças aplicadas são insuficientes para provocar fraturas ao longo de toda a partícula (VALADÃO, 2007). O aparecimento de pequenas fraturas ocorre porque prevalece uma concentração de esforços (tensão localizada) na área periférica, principalmente na superfície de contato das partículas. O resultado deste tipo de quebra é uma distribuição granulométrica onde existem partículas muito pequenas em contato com partículas de tamanho próximo ao original que vão reduzindo seus diâmetros gradativamente com o tempo. O atrito é responsável por esse tipo de quebra, quando partículas maiores são aprisionadas entre superfícies dotadas de movimento. O consumo de energia nesse mecanismo é alto e tem uma produção alta de superfinos. É observado frequentemente nos produtos de moagem autógena (GALLERY, 2011) e na britagem de minerais.

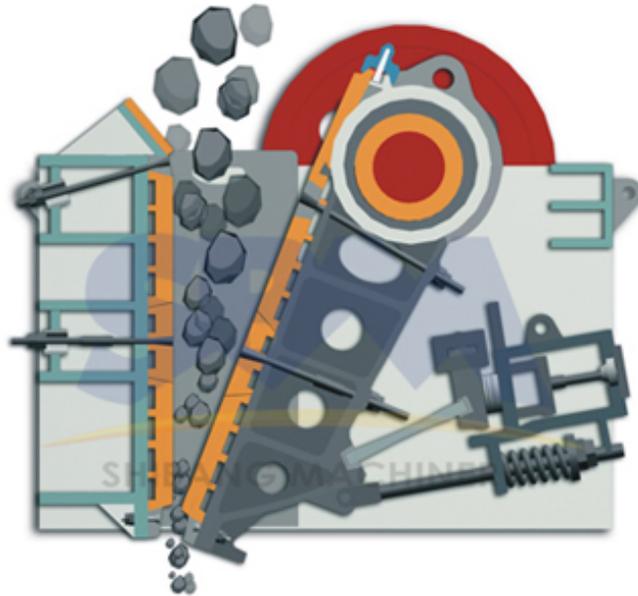
### 2.2.1. Britador de mandíbula

O processo de quebra do material pelo britador de mandíbula acontece principalmente pela ação da força de compressão. O britador de mandíbulas (FIGURA 6) tem um processo de cominuição satisfatório para capacidades de produção de até 1000 t/h. Não possui restrições quanto às características mecânicas das rochas e materiais abrasivos, mas é menos indicado para materiais úmidos argilosos (LUZ et al., 1998).

Os elementos mecânicos desse tipo de britador são uma placa metálica móvel (mandíbula móvel) que se move em movimento recessivo (aproxima-se e afasta-se) de uma placa metálica fixa (mandíbula fixa). A distância entre as duas mandíbulas na extremidade superior do britador é muito importante e chamada de *gape*, por determinar o tamanho do agregado a ser processado. O fragmento de rocha e minério a ser britado é introduzido no espaço entre as duas mandíbulas e esmagado durante o movimento de aproximação. Os fragmentos resultantes escoam para baixo, durante o movimento de afastamento das placas, cada qual se deslocando até uma posição em que fique contido pelas mandíbulas e seja novamente esmagado na próxima aproximação da mandíbula

móvel. Atrás da parte inferior da placa metálica móvel existe um calço que regula a abertura do britador, em equipamentos modernos esse calço é substituído por um macaco hidráulico que permite regular a abertura do britador em funcionamento e facilita a automação do circuito (CHAVES; PERES, 2012).

FIGURA 6 – BRITADOR DE MANDÍBULA



FONTE: MACHINERY (2015).

Por sua facilidade de operação, baixo custo de manutenção e menor emissão de poeira durante a operação é o britador mais utilizado em usinas de reciclagem de resíduos (MIRANDA, 2005).

O britador de mandíbulas frequentemente usado para britagens primária e secundária de materiais duros e abrasivos, resultando em um material relativamente graúdo com poucos finos (CHAVES; PERES, 2012). Cerca de 20% do material fica abaixo de 4,8 mm de diâmetro, sendo recomendado seu uso quando se deseja a produção de um material com baixa quantidade de finos (HANSEN, 2005; LUZ et al., 1998).

Apesar da produção de um material com grande porcentagem de fração graúda, o britador de mandíbula é pouco adequado para materiais com tendência a produzir partículas lamelares (FIGUEIRA et al., 2004). Mesmo em agregado de concreto ou de agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos constata-se a presença de grãos lamelares, sendo a maior concentração nestes últimos

(LEVY, 2001). Entretanto, não é conhecida a influência da lamelaridade nas propriedades das argamassas de revestimento.

### 2.2.2. Britador de impacto

Neste equipamento as partículas são despejadas no britador e atingidas pelo impacto dos martelos (FIGURA 7) e então são lançadas contra o revestimento onde sofrem fraturamento. A quebra ocorre ao longo de fraquezas estruturais preexistentes (planos de menor resistência, microfraturas, contornos de grão), tornando o produto da cominuição praticamente isento de fraquezas. As partículas recebem, portanto, apenas uma ou duas pancadas e tendem atravessar o equipamento rapidamente. O efeito do impacto é praticamente desprezível para partículas menores que 0,150 mm (peneira #100) e as partículas ultrafinas não sofrem nenhum impacto, pois são afastadas do rotor pelo movimento de ar em torno dele (CHAVES; PERES, 2012).

FIGURA 7 – BRITADOR DE IMPACTO



FONTE: SOLUTIONS (2015).

Apesar do britador de impacto não ser capaz de diminuir o tamanho das partículas ultrafinas, a distribuição granulométrica é mais fina que a do britador de mandíbulas, mas com menor geração de materiais finos menores que 75  $\mu\text{m}$ . Seu uso é limitado a rochas frágeis ou elásticas, e é efetivo para materiais com tendência a produzir partículas lamelares (gera formas mais cúbicas) e para materiais úmidos com alto teor de argila. Entretanto, tem elevado custo de manutenção e grande desgaste (LUZ et al., 1998). Dentre estes custos de manutenção está a troca periódica das placas de impacto e dos martelos que sofrem alta degradação (MIRANDA, 2005).

Apesar do seu valor de aquisição mais elevado, este britador tem grande capacidade de redução das dimensões das peças britadas, gerando grande percentual de finos, muitas vezes sendo necessária apenas uma britagem no processo de reciclagem (SILVA, 2009).

### 2.3. CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS

A variabilidade das características dos agregados reciclados de RCD depende da composição do resíduo e do equipamento de britagem adotado (LEITE, 2001).

#### 2.3.1. Morfologia das partículas

Nos últimos anos, aumentou o interesse pelo empacotamento das partículas nas diferentes áreas da engenharia. Esse interesse pode ser explicado pelo fato de uma grande parte dos materiais naturais possuírem diferentes formas e tamanhos (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). A forma das areias influencia diretamente no empacotamento das partículas, sendo grande a diferença entre a esfericidade e o arredondamento das areias quando se muda a origem e o tipo de britador para obtenção das mesmas (ARNOLD, 2011). O maior grau de arredondamento das areias aumenta quando possuem uma menor área, perímetro e dimensão máxima dos grãos, ou seja, é diretamente proporcional à forma do grão (TRISTÃO, 2005).

A forma dos grãos tem influência significativa no índice de vazios das argamassas, devido à grande diferença entre a esfericidade e o arredondamento. As argamassas produzidas com areias de britagem apresentaram maiores índices de vazios resultando em maior absorção de água. Quando se fala em diferentes tipos de britadores, a absorção de água é maior para a areia oriunda do britador de mandíbula que para areia natural de rio (ARNOLD, 2011). Além do que uma textura mais rugosa, o tamanho da partícula e a forma promovem uma boa aderência entre o agregado e a pasta da matriz (SAGOE-CRENTSIL, 2001). Sendo assim necessário o controle da morfologia dos agregados miúdos para se mensurar a influência do britador nos agregados.

Para caracterizar a morfologia dos agregados miúdos, pode-se citar o processamento de imagens, conforme procedimento da norma ISO 13322-1/04 (ISO, 2004), na qual as partículas são dispostas sobre uma superfície plana, suportes ou lâminas e adquiridos através de microscopia óptica. Um dos procedimentos empregados para se ter maior representatividade, por muitas vezes, compreende a classificação da amostra por intervalo granulométrico, no entanto este procedimento pode interferir diretamente nos resultados de parâmetros morfológicos.

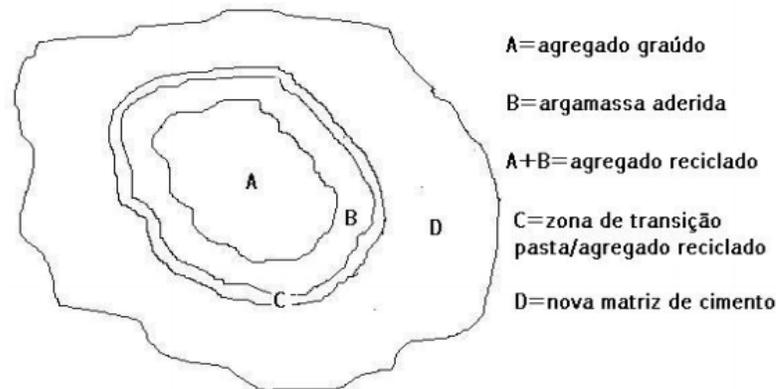
### 2.3.2. Teor de argamassa aderida

A estrutura de um agregado reciclado utilizado na produção de argamassa é composta pelo agregado natural, argamassa aderida em sua superfície que forma uma zona de transição. Essa argamassa aderida é a causa da menor densidade e maior absorção dos agregados reciclados quando comparado aos agregados naturais (JUAN; GUTIÉRREZ, 2009; HEINECK, 2012).

Os agregados naturais são geralmente densos e resistentes; assim a porosidade da matriz, bem como a zona de transição entre a matriz é que normalmente determinam características de resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Com isso, é razoável que as propriedades se modifiquem quando se substituem os agregados naturais por reciclados (CARRIJO, 2005).

A nova matriz de cimento em contato com o agregado reciclado dá origem a uma nova zona de transição, vistos pelos itens “C” e “D”, respectivamente, na FIGURA 8 (BUTTLER, 2003). A quantidade elevada de argamassa aderida ao grão influencia diretamente a segunda zona de transição, fazendo com que ela fique cada vez mais fraca.

FIGURA 8 – ESTRUTURA DO AGREGADO RECICLADO NA MATRIZ DE CIMENTO



FONTE: BUTTLER (2003).

Juan e Gutiérrez (2009) encontraram em seus estudos experimentais sobre a influência de diferentes porcentagens de agregado reciclado em concretos, teores de argamassa variando de 33% a 55%, em resíduos de construção oriundos de concreto, aumentando o teor de argamassa aderida com a diminuição do tamanho das partículas. A quantidade de argamassa (cimento mais areia) aderida tende a ser maior quando o tamanho dos agregados reciclados é menor (HANSEN, 2005). Essa afirmação só confirma 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 os agregados de dimensão 4 a 8 mm.

Um aspecto que influencia no teor de argamassa aderida é o número de esmagamentos no processo de britagem. O aumento do número de processos de britagem diminui a quantidade de argamassa aderida melhorando a qualidade do agregado final. No entanto, este fato provoca o aumento dos custos de produção, de modo que será necessário encontrar um equilíbrio entre o processo e a qualidade do agregado necessária (JUAN; GUTIÉRREZ, 2009). Além disto, nem sempre isto é viável, pois depende da demanda do mercado por determinado tamanho granulométrico.

### 2.3.3. Absorção de água e porosidade

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

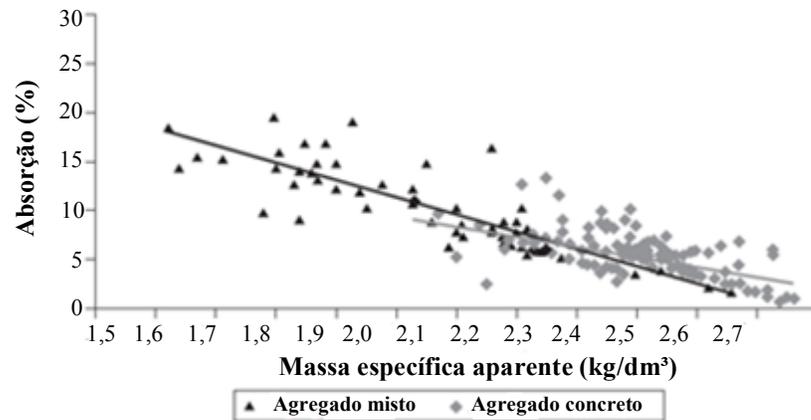
Essa propriedade é a que mais diferencia os agregados reciclados dos naturais (HANSEN, 1986; CARNEIRO et al., 2001) e está diretamente relacionada à porosidade do agregado reciclado devido ao teor de argamassa aderida que forma uma zona de transição em volta do agregado natural (CARRIJO, 2005; CHEN, YEN et al., 2003; MEHTA e MONTEIRO, 2008). Agregados naturais oriundos de britagem de rochas possuem pouca porosidade, o que implica em baixa ou nenhuma absorção de água (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A permeabilidade da argamassa ou concreto é maior que a permeabilidade da pasta de cimento correspondente devido as microfissuras que estão presentes na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, e esta permeabilidade aumenta com o tamanho do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A faixa de valores típicos de absorção dos agregados reciclados de concreto, de acordo com Saeed et al. (2007), varia de 4% a 8% para agregados miúdos. Os valores de absorção de água dos agregados naturais alcançam resultados em torno de 3%. As propriedades de absorção de água e massa específica aparente dos agregados reciclados dependem da sua natureza, sendo menores para agregados graúdos reciclados de concreto e, no caso de agregados mistos, podem alcançar

20% quando eles incluem uma quantidade grande de partículas cerâmicas (FIGURA 9) (SAIKIA e BRITO, 2013).

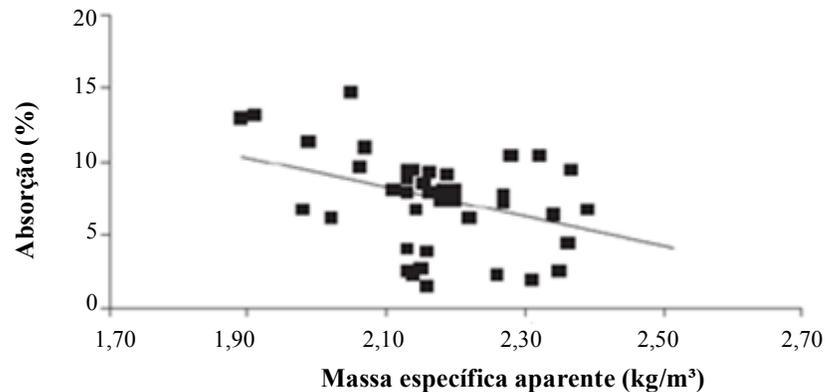
FIGURA 9 – CORRELAÇÃO ENTRE A ABSORÇÃO DE ÁGUA E A MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA FRAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO E AGREGADOS RECICLADOS MISTOS



FONTE: SAIKIA E BRITO (2013).

Já nos agregados reciclados miúdos, boa parte de sua fração miúda é composta pelas partículas da argamassa original que, por sua vez, normalmente apresentam altos valores de absorção (FIGURA 10) (SAIKIA; BRITO, 2013).

FIGURA 10 – CORRELAÇÃO ENTRE A ABSORÇÃO DE ÁGUA E A MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA FRAÇÃO MIÚDA DOS AGREGADOS RECICLADOS MISTOS



FONTE: SAIKIA E BRITO (2013).

#### 2.4. ARGAMASSAS COM AGREGADOS RECICLADOS

Interferências nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido podem ser devidas à distribuição granulométrica, teor de finos, forma e textura superficial dos grãos (ARNOLD, 2011).

Basicamente, os agregados reciclados de concreto se diferenciam dos naturais por possuírem argamassa aderida à superfície dos grãos, com isso tem-se uma menor massa específica e maior absorção de água (BUTTLER, 2003), o que causa influência na argamassa preparada com RCD de concreto.

A porosidade, oriunda da pasta de cimento remanescente de construções anteriores, é a propriedade que mais interfere nas características do agregado reciclado, uma vez que implicará também no aumento da área superficial exigindo um consumo maior de água e possível uso de aditivos (HAWLITSCHKEK, 2014).

Especificações dos requisitos exigíveis para argamassa utilizadas em assentamento e revestimento são dados pela NBR 13281 (2005): em revestimento, argamassas devem atender aos requisitos físicos e mecânicos; resistência à compressão, resistência à tração na flexão, densidade de massa no estado endurecido e fresco, coeficiente de capilaridade, retenção de água e aderência.

Conforme Butler (2007), o Brasil, felizmente encontra-se em posição de vanguarda nos conhecimentos sobre RCD, quando comparado a outros países da América Latina, devido à publicação da Resolução N° 307 do CONAMA (BRASIL, 2002) e à entrada em vigor de normas técnicas tratando do gerenciamento, utilização desse tipo de resíduo e sua classificação.

Apesar da Resolução N° 307 do CONAMA (BRASIL, 2002) o Brasil não possui uma norma que rege a utilização da areia reciclada em argamassa de revestimento, porém existe a NBR 15116 (2004) que especifica a utilização dos agregados reciclados em concreto sem função estrutural. Parâmetros como proporção de fragmentos compostos de rocha e cimento, absorção e material passante na peneira 75 $\mu$ m, são analisados para que se possa utilizar esse material em argamassa de revestimento.

A NBR 15116 (2004) permite a classificação e o emprego de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em pavimentos e preparação de concreto sem função estrutural nas classes de resistência à compressão C10 e C15, classificados em dois tipos:

a) ARC (agregado de resíduo de concreto) – agregados reciclados obtidos do beneficiamento de resíduos da Classe A, constituídos de uma fração graúda mínima de 90%, em massa, de fragmentos compostos por cimento Portland e rochas;

b) ARM (agregado de resíduo misto) – agregados reciclados obtidos do beneficiamento de resíduos da Classe A, constituídos de uma fração graúda, em massa, inferior a 90% de fragmentos compostos por cimento Portland e rochas.

Para o preparo de concreto reciclado sem função estrutural deve ser realizada a pré-saturação do agregado reciclado, considerando-se valores próximos a 80% da absorção total do agregado. As principais exigências para os agregados reciclados destinados à produção de concreto sem função estrutural são apresentadas na TABELA 1.

TABELA 1 – EXIGÊNCIAS PARA OS AGREGADOS RECICLADOS DESTINADOS A PRODUÇÃO DE CONCRETO NÃO-ESTRUTURAL

Propriedades		Agregado reciclado - Classe A				Normas	
		ARC		ARM		Agr. Graúdo	Agr. Miúdo
		Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo		
Proporção de fragmentos compostos por cimento e rochas		-	≥ 90%	-	≤ 90%	-	-
Absorção (%)		≤ 12%	≤ 7%	≤ 17%	≤ 12%	NBR NM 30	NBR NM 53
Contaminantes (proporção máxima em relação a massa de agregado reciclado)	Cloretos	≤ 1%				NBR 9917	
	Sulfatos	≤ 1%				NBR 9917	
	Materiais não-minerais	≤ 2%				-	-
	Partículas de argila	≤ 2%				NBR 7218	
	Máxima proporção de contaminantes	≤ 3%				-	
Material passante na peneira 75 µm		≤ 15%	≤ 10%	≤ 20%	≤ 10%	NBR NM 46	

FONTE: NBR 15116 (2004).

A norma EN 13139 (2002) especifica as propriedades de agregados obtidos por processo natural, produção ou por materiais reciclados (TABELA 2) e misturados em argamassa.

TABELA 2 – REQUISITOS DE AGREGADOS PARA ARGAMASSA

Propriedade	Método	Frequência	Parâmetro
Tamanho de agregado e classificação	EN 933-1	1 por semana	-
Propriedades geométricas	EN 933-7	1 por ano	-
Finos	EN 933-1 EN 933-8 EN 933-9	Quando necessário 1 por semana	Porcentagem máxima passante pela 0,063mm 30% (Categoria 4)
Densidade das partículas	EN 1097-6	Quando requerido	-
Teor de cloreto	EN 1744-1:1998 item 7	1 a cada 2 anos	Teor de íons solúveis na água < 0,15%
Teor de sulfato	EN 1744-1:1998 item 12	1 por ano	<0,2 AS <sub>0,2</sub> <0,8 AS <sub>0,8</sub>
Composto contendo enxofre	EN 1744-1:1998 item 11	1 por ano	< 1% de enxofre (Em massa)
Material solúvel em água	EN 1744-1:1998 item 16	Quando necessário 1 por semana	< 1% (Em massa)
Resistência ao congelamento e descongelamento	EN 1367-1 EN 1367-2	Quando requerido	-
Reação álcali-sílica	-	Quando requerido	-
Substâncias perigosas	-	Quando requerido	-

FONTE: EN 13139 (2002).

#### 2.4.1. Propriedades no estado fresco

As propriedades das argamassas no estado fresco sofrem influência direta da morfologia e da granulometria do agregado miúdo, especificamente da sua forma, textura e tamanho, parâmetros que dependem da origem e natureza do material.

Alterações nas propriedades de argamassas no estado fresco podem ser verificadas em função dos parâmetros texturais das areias, ou seja, quanto mais arredondado, esférico e menos rugosa a textura superficial, menor a quantidade de pasta necessária para garantir a trabalhabilidade, implicando em menor consumo de aglomerante e água de amassamento (TRISTÃO, 2005).

##### 2.4.1.1. Trabalhabilidade

O teor de água é maior para argamassas de agregados reciclados quando comparado ao agregado natural, respeitando o mesmo nível de trabalhabilidade. É evidente que a presença de finos provenientes do agregado reciclado e a quantidade mais elevada de água causam uma redução de tensão e viscosidade na argamassa (CORINALDESI E MORICONI, 2008).

Possíveis dificuldades de aplicação (trabalhabilidade) das argamassas, como um baixo espalhamento, podem ser corrigidas com o aumento do teor de ar incorporado, segundo

Hawlitschek (2014). Ele incorporou uma faixa dos 20% de ar incorporado, em volume, em argamassas com RCD e notou em todas elas um comportamento semelhante, uma elevada facilidade de espalhamento. Aditivos incorporadores de ar, quando adicionados em argamassas, modificam a tensão superficial do meio líquido, aumentando assim a capacidade de molhamento do pó. As bolhas contribuem para o afastamento dos grãos, diminuindo assim o atrito interno (ROMANO, 2013).

A relação de porosidade por área superficial tem influência sobremaneira tanto no consumo de água como no consumo de aditivos, duas variáveis de extrema importância na viabilização econômica e técnica das argamassas com agregados reciclados. Sendo assim, recomenda-se a utilização dessa relação como parâmetro de controle de qualidade no processo de reciclagem do RCD (HAWLITSCHKEK, 2014).

A trabalhabilidade também está relacionada ao formato do grão. Arnold (2011) constatou em seus ensaios com argamassa que quanto mais arredondado o agregado menor a quantidade de água para se atingir o índice de consistência desejado. A esfericidade e o arredondamento dos grãos influenciam diretamente a trabalhabilidade das argamassas. A diferença de consistência em função da substituição de um agregado mais arredondado por um com baixo coeficiente de arredondamento e esfericidade foi da ordem de duas vezes, no estudo realizado.

Heineck (2012) observou que os agregados miúdos oriundos de resíduos de construção civil são mais rugosos que os naturais, ou seja, tendem a apresentar pior trabalhabilidade e prejudicando possivelmente a estética do acabamento da argamassa. A produção de argamassa com agregado natural e agregado reciclado com a mesma consistência fixada em  $260 \pm 5$  mm resultou em uma diferença de 6% a 7% no teor de água em comparação com a argamassa de agregado natural, devido à alta porosidade do agregado reciclado pela presença de argamassa aderida nos grãos.

A forma dos grãos também influencia o comportamento reológico das argamassas e o empacotamento das mesmas, grãos mais arredondados e esféricos tendem a se movimentar com mais facilidade que os grãos lamelares (HEINECK, 2012).

#### 2.4.1.2. Teor de finos $< 75 \mu\text{m}$ e fissuração

A quantidade total de finos em argamassas com areia reciclada pode variar de 20 a 40%, o que influencia nas propriedades nos estados fresco e endurecido das argamassas. Deste modo, o

principal controle a ser realizado com rigorosidade é a quantidade de materiais finos menores que 75  $\mu\text{m}$ , incluindo aqui os finos provenientes dos aglomerantes (MIRANDA, 2000).

Enquanto o teor de materiais finos ( $< 75 \mu\text{m}$ ) das areias naturais beneficiadas raramente ultrapassa 5%, este é o valor mínimo encontrado em areias recicladas de RCD. Como o RCD normalmente vem misturado com materiais cerâmicos, este valor pode oscilar facilmente entre 15% e 30%, garantindo uma boa trabalhabilidade da argamassa. Assim, é desnecessário utilizar cal em argamassas com areia reciclada que tenha elevado teor de materiais finos, sendo isto uma vantagem econômica (MIRANDA; SELMO, 2003).

Amostras com teores de finos maiores que 23% mostram que pode estar presente no resíduo outro tipo de material que gera um teor mais elevado, por exemplo, solo (MIRANDA, 2005).

O teor de finos pode propiciar a ocorrência da retração plástica. Segundo Carasek (2007), os finos, devido à sua alta área de superfície específica e à sua natureza, necessitam de maior quantidade de água de amassamento para atingir determinada trabalhabilidade, aumentando assim à retração e conseqüentemente a fissuração. Sendo assim, a resistência mecânica do revestimento fica comprometida em função da alta relação água/aglomerante.

Miranda (2000) pesquisou argamassas produzidas com diferentes agregados reciclados (restos de bloco cerâmico, argamassa e blocos de concreto). Em seu estudo as argamassas foram dosadas considerando o teor total de finos  $< 75 \mu\text{m}$  e a relação agregado/cimento. Foi constatado que um teor total de finos  $< 75 \mu\text{m}$  de 32% tem influência na fissuração, independente da natureza do agregado reciclado, sendo que o valor crítico para a fissuração poderá depender da distribuição granulométrica da argamassa e da relação água/cimento, recomendando não ultrapassar o teor de 25% de finos totais, onde se iniciaram as fissuras por secagem do revestimento da argamassa mista e suficiente para se obter boa trabalhabilidade.

Comparando-se argamassas produzidas com mesmos teores de finos, as maiores densidades de massa são daquelas com maiores proporções de resíduo oriundo de blocos de concretos e menores naquele oriundo de material cerâmico (MIRANDA, 2000).

Nas argamassas de assentamento da região de Curitiba, as propriedades mostraram estar correlacionadas com outras propriedades como: densidade de massa no estado fresco, teor total de finos  $< 75 \mu\text{m}$  e absorção de água do agregado. A densidade no estado fresco mostra-se estar

correlacionada com o teor total de finos  $< 75 \mu\text{m}$  e absorção de água, que também estão correlacionadas com a fissuração no estado endurecido (PORTO; MIRANDA; ANGULO, 2012).

Para controlar a fissuração em argamassas de revestimento produzidas com agregado reciclado, as tensões capilares são reduzidas por meio de uma boa mistura: controlando os finos, distribuição do tamanho dos grãos e a relação água/cimento (MIRANDA, 2006).

Miranda et al. (2013) em seus estudos sobre argamassa de assentamento com agregado reciclado, cisalhamento e resistência à flexão, obteve resultados que indicam a influência do elevado conteúdo de finos  $< 75 \mu\text{m}$  e de alta absorção de água. O estudo propôs uma metodologia para dosagem da argamassa com teor total de finos menor que 23% e consumo de cimento  $> 150 \text{ kg/m}^3$ .

#### 2.4.2. Propriedades no estado endurecido

As argamassas no estado endurecido apresentam variações em suas propriedades, em função da origem do agregado utilizado, relação água/materiais secos, quantidade de materiais finos  $< 75 \mu\text{m}$ . As propriedades afetadas diretamente são a aderência da argamassa de revestimento, resistência à tração e à compressão.

A porosidade dos agregados influi diretamente nas propriedades mecânicas, pois quanto maior o consumo de água e o teor de ar incorporado, maior será a porosidade no estado endurecido e, conseqüentemente, menor sua resistência à tração (HAWLITSCHKEK, 2014).

##### 2.4.2.1. Aderência

Cabe lembrar que a variabilidade relativamente alta é intrínseca à propriedade. Isto decorre do fato de que a resistência de aderência é influenciada por diversos fatores altamente variáveis, tais como os materiais da base, as características da argamassa, as condições climáticas e a energia de aplicação (FIGURA 11) (CARASEK, 2012).

FIGURA 11 – FATORES QUE EXERCEM INFLUÊNCIA NA ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS SOBRE BASES POROSAS



FONTE: CARASEK (2010).

Salienta-se que, em geral, resultados de ensaios de resistência de aderência à tração apresentam alta dispersão, resultando em coeficientes de variação da ordem de 10% a 35%, mas chegam muitas vezes à faixa de 50% a 60%. Em geral, na estatística, um coeficiente de variação igual a 25% é considerado como limite para se considerar uma amostra aceitável. No entanto, tendo em vista todos os aspectos que influenciam os resultados, aceitam-se, para resistência de aderência à tração, valores mais elevados (CARASEK, 2012).

A resistência de aderência à tração representa a capacidade das argamassas resistirem aos esforços normais de tração. Essa propriedade é de suma importância principalmente para argamassas de revestimento que podem perder a aderência ao substrato ao longo de sua vida útil. Assim como as demais propriedades, não depende somente das características do agregado, mas também da base ao qual a argamassa está aplicada. Diversos pesquisadores comprovaram que a resistência de aderência à tração aumenta com o uso do agregado reciclado e explicam que isso ocorre posto que os grãos desse agregado tendem a ser mais lamelares e que, portanto proporcionam um travamento da argamassa com o substrato (SANTANA et al., 2001).

Entretanto, isto não é de senso comum. Miranda (2000) obteve resultados de resistência de aderência à tração de argamassas de revestimento com areia reciclada inferiores aos obtidos quando se utilizou areia natural. Isto pode ser explicado por duas razões: maior relação água/cimento das argamassas com areia reciclada e substituição da absorção de cimento pelo substrato responsável pela formação de ponte de aderência por finos inertes do agregado reciclado.

#### 2.4.2.2. Resistência mecânica

A porosidade e forma lamelar dos grãos dos agregados reciclados influenciam a resistência mecânica das argamassas, tanto na compressão, quanto à tração na flexão. A forma e composição desses grãos resultam em maiores demandas de água o que justifica a perda de resistência à compressão, ao contrário da resistência à tração na flexão, pois a forma lamelar propicia melhor aderência da argamassa com os grãos (HEINECK, 2012).

Estudos sobre substituição parcial da areia natural por areia proveniente de resíduos de construção em 5%, 10% e 15%, mostram incrementos de 23%, 56% e 99% sobre a resistência à flexão em relação à argamassa sem substituição. No ensaio de resistência a compressão, os resultados correspondentes foram 38%, 96% e 121% respectivamente. O coeficiente de absorção de água diminui (29%, 40% e 44%) respectivamente (BRAGA; BRITO; VEIGA, 2012).

Uma das causas do aumento da resistência à compressão pode ser a atividade pozolânica. Ela acontece quando o agregado reciclado apresenta pozolanas que são constituídas de sílica e alumina que, em presença de água, combinam-se com o hidróxido de cálcio e com diferentes componentes do cimento formando compostos com propriedades aglomerantes. As pozolanas podem ser artificiais: argilas de qualquer tipo submetidas a altas temperaturas para desidratação; e subprodutos industriais: cinzas volantes; cinza de casa de arroz, sílica ativa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Grigoli e Helene (2002) afirmam que o agregado reciclado que contém grandes quantidades de materiais cerâmicos permite um aumento da resistência mecânica da argamassa ao longo de uma determinada idade de cura em razão do grau de pozolanicidade. O aumento da resistência se dá também em virtude do empacotamento das partículas (fechamento dos poros) que para os materiais cerâmicos é maior por possuir em sua maioria materiais da fração pulverulenta. Entretanto, Corinaldesi e Moriconi (2008) não encontraram nenhum efeito pozolânico no pó de tijolo utilizado em seus experimentos.

Carneiro et al. (2001), Santana et al. (2001) e Assunção et al. (2007) constataram que quando se tem a utilização de 50% do agregado miúdo reciclado a resistência à compressão aumenta em 25% em relação a argamassa com agregado natural. E segundo Paixão (2013), 80% da resistência total aos 28 dias é alcançada aos 7 dias de cura. Isso ocorre devido à rápida evolução da hidratação da argamassa com agregado reciclado, que pode ser resultado da taxa de absorção mais alta do agregado, que diminui a água da mistura, gerando uma pasta com maior densidade.

Na aplicação de Dapena et al., (2011), a utilização de 20% do agregado reciclado reduz a resistência à compressão e à flexão, e por isso indicam o uso de 10%. Dessa forma, é importante frisar que a variabilidade do agregado é significativamente responsável pelo desempenho das argamassas e que, portanto deve ser bem avaliada para que seja proposta uma dosagem para estes materiais.

Ainda sobre resistência mecânica, Heineck (2012), encontrou resistências de aproximadamente 64% menores nas argamassas feitas com RCD de origem de concreto comparando com argamassa produzida com agregado natural.

Muitos resultados elevados de resistência obtidos em argamassas com RCD reciclado são justificados pela presença de material pozolânico, sem sequer ter sido verificado se tal atividade existe no material. Para que haja atividade pozolânica, é necessário o agregado reciclado reagir com a cal, produzindo um gel cimentício complexo. Isso só ocorre de forma significativa para materiais com sílica e alumina em estado amorfo e muito fino, da ordem de micrometro (MIRANDA; SELMO, 2003).

Nota-se também que as curvas granulométricas influenciam nas propriedades das argamassas de revestimento. A molhagem prévia do agregado reciclado, para que o mesmo não absorva a água necessária para o amassamento, melhora praticamente todas as propriedades, e nas que não ocorreu melhora, permanecera igual às propriedades com o agregado reciclado seco previamente (JOCHEM, 2012).

Na maioria dos trabalhos que apresentam maior valor de resistência à compressão para argamassas com RCD reciclado do que para as com agregado natural, não é considerada a absorção de água da areia reciclada, que pode variar entre 5% e 15% ou até mais dependendo da composição. Esta água absorvida pela areia reciclada não influencia significativamente a formação de poros na microestrutura das argamassas consideradas e não deve ser incluída no cálculo da relação água-cimento. Não descontar a água absorvida pode levar à conclusão errônea de que argamassas com RCD reciclado, de maior relação água-cimento que argamassas feitas com agregado natural, resulta em maior resistência (MIRANDA; SELMO, 2003).

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo estão descritos os procedimentos experimentais realizados, desde a concepção, normas utilizadas, descrição dos ensaios não normatizados, passando pela caracterização dos materiais, até a produção das argamassas.

A pesquisa se inicia com o motivo de avaliar a influência dos britadores de impacto e mandíbula na produção de agregados reciclados. Os agregados reciclados abordados foram o de origem mista (composição cerâmica, concreto e argamassa) e de concreto.

O primeiro procedimento foi a coleta de material a ser analisado e disposto, posteriormente, em pilhas homogêneas. Com as pilhas formadas coletou-se parte do material e submeteu-o a secagem em estufa a 100 °C por no mínimo 24 horas.

O procedimento seguinte se deu através do peneiramento, separando o material em fração miúda e graúda, descartando essa última fração, por não ser o foco da pesquisa.

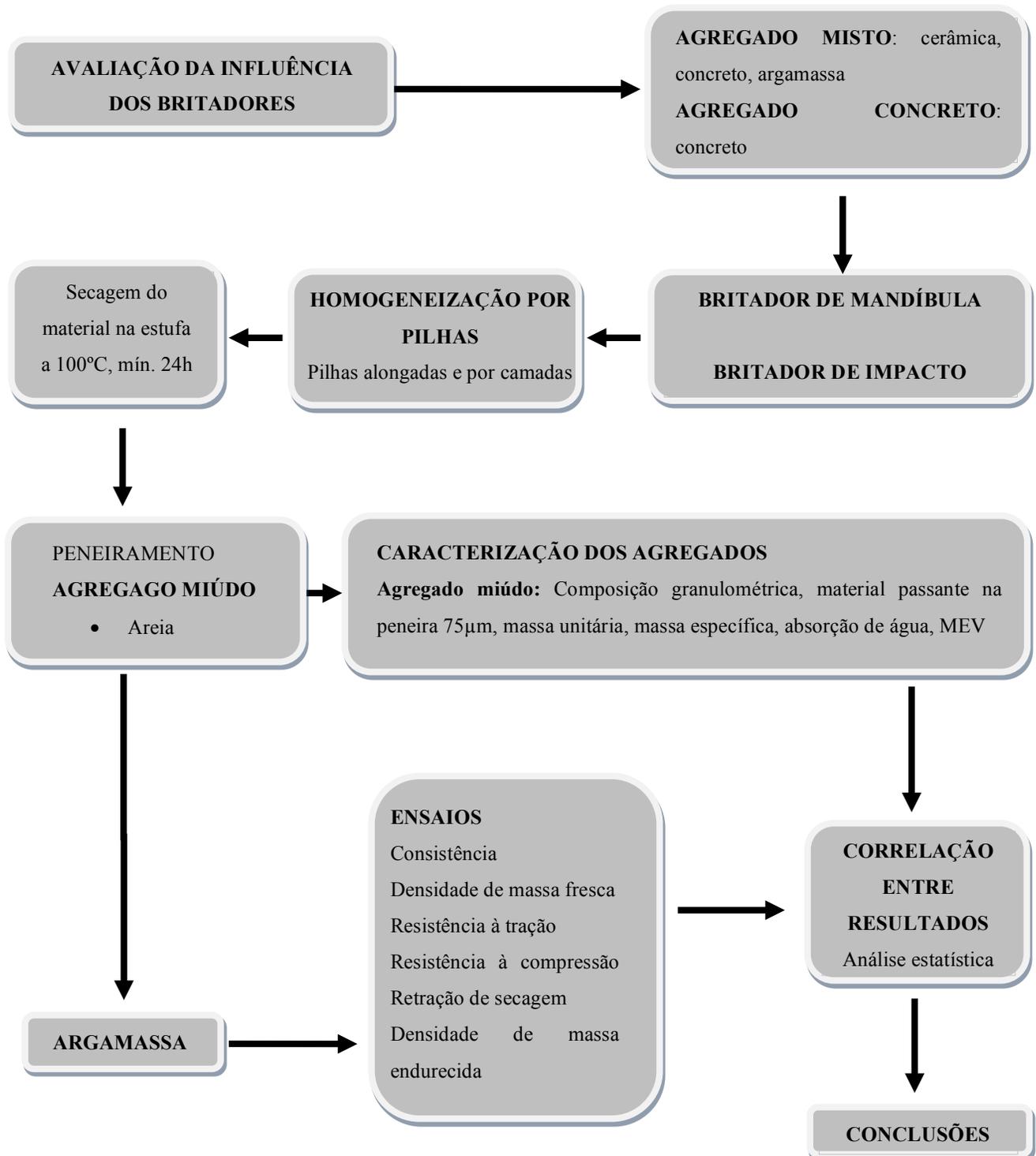
Composição granulométrica, material passante na peneira 75 µm, massa unitária, massa específica, absorção de água, MEV foram os parâmetros adotados para poder se realizar a caracterização de agregados miúdos reciclados, através de ensaios específicos.

Para a análise de argamassa produzidas com agregados reciclados adotaram-se os seguintes ensaios: consistência; densidade de massa fresca; resistência à tração na flexão; resistência à compressão; retração de secagem e; densidade de massa endurecida.

Com os resultados da caracterização associados aos ensaios específicos para argamassa pode-se fazer correlações e análises estatísticas, podendo assim chegar a conclusão de influência ou não influência dos parâmetros analisados no desempenho de argamassas produzidas com agregados reciclados.

O fluxograma abaixo apresenta de forma esquemática os passos de desenvolvimento da pesquisa como já descrito anteriormente (FIGURA 12).

FIGURA 12 – FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2015).

### 3.1. OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE RCD

Com o objetivo de comparar os dois britadores, observou-se a necessidade de garantir que a capacidade do britador de impacto e do britador de mandíbula fosse a mesma, respeitando a produção horária e a dimensão máxima característica do agregado produzido. O britador de mandíbula escolhido foi o modelo 6040 com capacidade de 50 t/h da usina PROGRARU em Guarulhos/SP (FIGURA 13) com posição aberta de 101 mm e abertura máxima de 150 mm.

FIGURA 13 – USINA DE RECICLAGEM PROGRARU



FONTE: PROGRARU (2015).

O britador de impacto adotado foi um equipamento de 50 t/h com 10 martelos, motor 50 cv, *top-size* de 150 mm (abertura do britador), da empresa URBEM (FIGURA 14), em São Bernardo dos Campos/SP, onde foram coletados os RCD dessa pesquisa.

FIGURA 14 – USINA DE RECICLAGEM URBEM



FONTE: O autor (2015).

Escolheram-se dois lotes de cada tipo de resíduo (misto e concreto) mais homogêneos disponíveis, denominados de amostras A e B, e isolaram-se esses dos demais materiais estocados. Foram coletadas duas amostras de RCD misto e duas amostras de concreto de cada lote. As amostras de concreto foram compostas de pedaços variando de 20 a 50 cm de comprimento, sendo coletados materiais de vários pontos do lote manualmente e acondicionados em sacos resistentes para posteriormente serem beneficiados em um britador de mandíbula (FIGURA 15). Já a amostra mista foi recolhida com a ajuda de uma pá de vários lugares do lote, visando a representatividade do mesmo.

FIGURA 15 – COLETA MANUAL DO MATERIAL DE CONCRETO NA URBEM



FONTE: O autor (2015).

Após da obtenção da amostra bruta usou-se uma carregadeira para recolher o material restante de cada lote e inseri-lo no britador de impacto individualmente (FIGURA 16).

FIGURA 16 – COLETA DO MATERIAL DE CONCRETO POR PÁ CARREGADEIRA PARA BRITAGEM NA URBEM



FONTE: O autor (2015).

Para garantir a inexistência de material proveniente de outras britagens que interferisse no resultado das amostras, limpam-se os britadores e as correias transportadoras antes do despejo da amostra no alimentador, em seguida o material foi coletado na correia transportadora que ficava logo na saída dos britadores (FIGURA 17).

FIGURA 17 – COLETA DO MATERIAL BRITADO NA CORREIA TRANSPORTADORA NA URBEM



FONTE: O autor (2015).

A FIGURA 18 traz uma visão geral do processo de britagem para o material coletado.

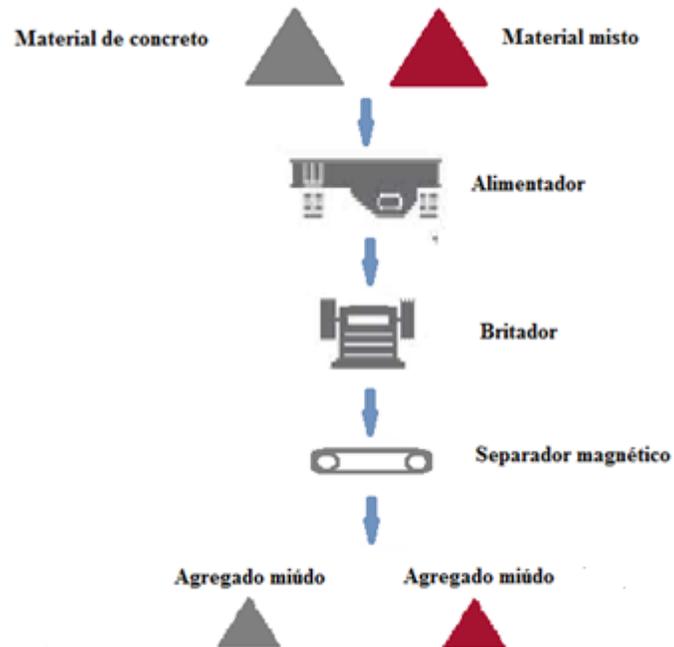
Esse procedimento resultou em 140 kg de amostras de material britado oriundo de concreto e 140 kg de material cerâmico de cada britador para cada um dos lotes, formando oito amostras conforme TABELA 3.

TABELA 3 – SUBDIVISÃO DAS AMOSTRAS

PARÂMETROS			
AMOSTRAGEM	BRITADOR	MATERIAL	ABREVIACÃO
AMOSTRA A	MANDÍBULA	CONCRETO	MCA
		MISTO	MMA
	IMPACTO	CONCRETO	ICA
		MISTO	IMA
AMOSTRA B	MANDÍBULA	CONCRETO	MCB
		MISTO	MMB
	IMPACTO	CONCRETO	ICB
		MISTO	IMB

FONTE: O autor (2015).

FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DA AMOSTRAGEM DO MATERIAL



FONTE: O autor (2015).

Depois da coleta do material, foi executada a homogeneização das amostras, distribuindo os materiais em uma linha reta com aproximadamente 3 m (FIGURA 19), com velocidade uniforme e ininterrupta, altura de queda constante de 15 cm, formando diversas camadas, com seção triangular, garantindo a redução da heterogeneidade do lote.

FIGURA 19 – PILHAS LONGAS DE HOMOGENEIZAÇÃO



FONTE: O Autor (2015).

Foram retiradas duas amostras de igual tamanho no meio da pilha, com 35 kg em cada amostra para a caracterização do material (repetição 1 e 2). As extremidades das pilhas foram evitadas com o objetivo de evitar heterogeneidade das amostras. Posteriormente, foram produzidas as argamassas. A FIGURA 20 exemplifica o procedimento em que as duas amostras de 35 kg foram retiradas para realização dos ensaios e o restante estocado em caixas de armazenamento para posterior utilização.

FIGURA 20 – REDUÇÃO DA AMOSTRA



FONTE: O Autor (2015).

Todos os agregados utilizados nesta pesquisa foram homogeneizados e reduzidos à quantidade para cada ensaio com o auxílio do redutor de amostras tipo Jones (FIGURA 21).

FIGURA 21 – REDUTOR DE AMOSTRAS TIPO JONES



FONTE: O autor (2015).

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS

Para caracterização dos agregados reciclados foram utilizadas normas que abrangem tanto naturais como reciclados, conforme TABELA 4. Porém, para análise de algumas propriedades, buscaram-se os ensaios complementares descritos a seguir.

TABELA 4 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

CARACTERIZAÇÃO	NORMA
Composição granulométrica	NBR NM 248 - 2003
Material passante na peneira 75 $\mu$ m	NBR NM 46 - 2003
Massa unitária	NBR NM 45 - 2006
Massa específica - Agregados miúdos	NBR NM 52 - 2009
Absorção de água - Agregados miúdos	NBR NM 30 - 2001
Absorção do agregado miúdo no micro-ondas	(Descrito a seguir)
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	(Descrito a seguir)

FONTE: O autor (2015).

#### 3.2.1. Microscopia Eletrônica de Varredura

Para analisar o formato e textura dos grãos da fração miúda dos agregados (FIGURA 22), realizou-se o ensaio de microscopia eletrônica de varredura em uma amostra de cada material, sendo ela passante pela peneira 0,3 mm e retida na peneira 0,15 mm.

FIGURA 22 – AMOSTRAS PARA MEV



FONTE: O autor (2015).

O equipamento usado foi o Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN VEGA3 LMU (FIGURA 23), com resolução de até 3nm, que analisa aspectos tridimensionais por estereoscópica de elétrons secundários. O programa foi o Mex da empresa Alicona.

FIGURA 23 – EQUIPAMENTO DE MEV

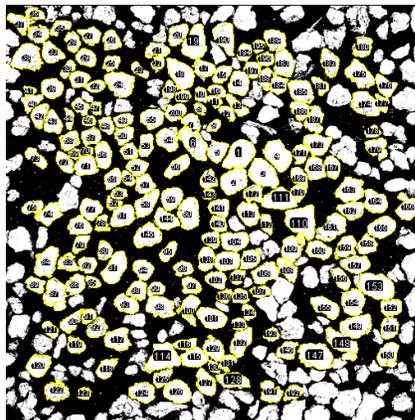


FONTE: O autor (2015).

Utilizou-se a metodologia proposta por Tristão (2005) onde se aplicou o uso de imagem digitalizada para obter parâmetros de forma e textura dos grãos dos agregados miúdos.

Para o ensaio optou-se por utilizar o agregado retido na peneira 0,15 mm a fim de preencher aproximadamente 200 grãos no amostrador padrão do MEV com aproximadamente 1 cm de diâmetro. A imagem resultante do MEV do material processado no britador de impacto com origem mista da amostra A pode ser observada na FIGURA 24.

FIGURA 24 – MEV ESCALA 2 MM AMOSTRA IMA



FONTE: O autor (2015).

As imagens dos grãos de areia foram analisadas no software IMAGEJ. Este programa possibilita a medição de cada grão quanto aos seus diâmetros, de maior e menor dimensão, perímetro e área superficial. Para medir as maiores e menores dimensões do agregado é utilizado respectivamente, o diâmetro máximo de Feret correspondente ao menor círculo circunscrito na partícula e o diâmetro mínimo de Feret correspondente ao máximo círculo inscrito na partícula. A partir desses dados foi possível calcular o arredondamento, esfericidade e índice de forma que cada grão.

O arredondamento foi calculado a partir da Equação 1:

$$A_r = \frac{4S}{\pi(d_{\text{máx}})^2} \quad (1)$$

Onde:

Ar = arredondamento

S = área da projeção da partícula (mm<sup>2</sup>)

D<sub>máx</sub> = diâmetro máximo de Feret (mm)

FONTE: TRISTÃO (2005)

A esfericidade foi calculada a partir da Equação 2:

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

Onde:

F<sub>f</sub> = esfericidade

S = área de projeção da partícula (mm<sup>2</sup>)

P = perímetro da projeção da partícula (mm)

FONTE: TRISTÃO (2005).

### 3.2.2. Absorção do agregado miúdo no micro-ondas

Seguindo o método proposto na pesquisa de Kaneko (2014), a amostra foi composta pelo material passante pela peneira 4,8 mm, seca 24h em estufa a 100 °C, com aproximadamente 150g. O método de saturação realizado nesse trabalho foi a vácuo – 500 mmHg por 30 minutos (FIGURA 25), juntamente com agitação do recipiente para retirada das bolhas de ar em 1, 3, 5, 10 e 15 minutos do início do ensaio e replicado a pressão imediatamente.

FIGURA 25 – SATURAÇÃO A VÁCUO



FONTE: O autor (2016).

Para a realização do ensaio foi utilizado o mesmo conjunto de equipamentos utilizados por Kaneko (2014) (FIGURA 26): Balança Shimadzu – Modelo: UX4200H, Balão Volumétrico PHOX 2000 ml, Bomba de Vácuo e Pressão QUIMIS - Modelo: Q355B, Computador Creative 52Xmx (Sistema operacional: Windows XP) e Micro-ondas PANASONIC 28L – Modelo: NNS 56 B – Potência nominal: 900 W.

FIGURA 26 – CONJUNTO PARA ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR MICRO-ONDAS: COMPUTADOR, BALANÇA DIGITAL, MICRO-ONDAS PERFURADO NA PARTE SUPERIOR



FONTE: O autor (2016).

O recipiente com o material miúdo foi 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 preaquecimento do conjunto de 30 minutos e após a retirada do excesso de água limpa sobre a amostra.

Reiniciou-se a secagem com a massa da amostra sendo medida a cada 20 segundos através da ligação da balança com um computador até que a taxa de secagem fique linearmente decrescente (momentos próximos à estabilização da massa do conjunto). Estas medições geraram 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  $t$ . Os intervalos usados para as medições foram de 20 segundos, pois se mostraram adequados 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 umidade foi calculada através da Equação 3 e a taxa de secagem de acordo com a Equação 4.

A taxa de umidade a cada instante ( $t$ ), em porcentagem, foi obtida pela subtração entre a massa do conjunto agregado/água no instante ( $t$ ) e a  $M_{seca}$ , dividido pelo valor da  $M_{seca}$ .

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

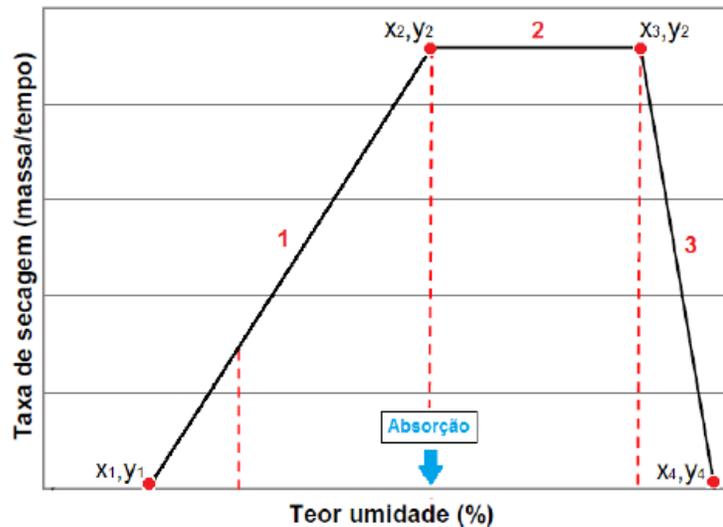
(3)

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  $(t - 1)$  anterior, dividida pelo próprio intervalo de tempo.

$$\text{Taxa de secagem (t) (massa/tempo)} = \frac{M_{\text{conj. agreg/água}_{(t-1)}} - M_{\text{conj. agreg/água}_{(t)}}}{(t) - (t-1)} \quad (4)$$

Para encontrar o valor da umidade foram criadas retas através do programa *Origin* com uma função que garante o menor desvio padrão dos dados em relação às três retas juntas conforme a FIGURA 27.

FIGURA 27 – GRÁFICO BASE PARA DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO NO ORIGIN



FONTE: KANEKO (2014).

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Foram adotados métodos de ensaio que avaliaram as propriedades das argamassas de revestimento produzida com agregados reciclados, apresentados na TABELA 5, com procedimentos normalizados, sendo que, no estado fresco, foi avaliada a consistência, e a densidade, no estado endurecido os parâmetros estudados foram a resistência à tração na flexão, resistência à compressão, retração por secagem e a densidade no estado endurecido.

TABELA 5 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

<b>ARGAMASSA</b>	<b>NORMA</b>
Consistência	NBR 13276 - 2005
Densidade de massa fresca	NBR 13278 - 2005
Resistência à tração na flexão	NBR 13279 - 2005
Resistência à compressão	NBR 13279 - 2005
Retração de secagem	NBR 15261 - 2005
Densidade de massa endurecida	NBR 13278 - 2005

FONTE: O autor (2015).

### 3.3.1. Materiais utilizados

Para produção das argamassas de revestimento usou-se cimento e areia reciclada na proporção em massa seca 1:7, traço também utilizado por Miranda (2000). Não se optou em utilizar a cal uma vez que a areia reciclada possui finos suficientes para proporcionar a plasticidade adequada à argamassa. O cimento utilizado foi o CP II F-32 da Itambé conforme a caracterização apresentada na TABELA 5.

TABELA 6 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MECÂNICA DO CIMENTO PORTLAND CP II F – 32

<b>Ensaio</b>	<b>Valores (%)</b>	<b>Limites ABNT NBR 11578:1997</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	-
Finura	peneira # 200 (%)	≤ 12
	peneira # 325 (%)	-
Tempo de pega	Início (h:min)	≥ 1
	Fim (h:min)	≤ 10
Consistência normal (%)	26,3	-
Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	323	≥ 260
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	-
	3 dias	≥ 10
	7 dias	≥ 20
	28 dias	≥ 32
Composição química (%)	perda ao fogo	≤ 6,5
	resíduo insolúvel	≤ 16,0
	trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	≤ 4,0
	óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5
	óxido de cálcio (CaO)	-
	óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-
	dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	-
	óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-

FONTE: ITAMBÉ (2015).

Para padronização das argamassas foram fixados o consumo de cimento em  $170 \text{ kg/m}^3 \pm 10 \text{ kg/m}^3$  e a consistência da argamassa em  $300 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ .

Vale salientar que todas as especificações contidas na NBR 11578:1997 foram atendidas pelo fabricante.

Para água de amassamento e para a umidificação dos agregados reciclados utilizou-se a água da rede pública de distribuição fornecida pela SANEPAR.

### 3.3.2. Método de mistura

O método de mistura das argamassas para realização dos ensaios no estado fresco e endurecido foi o mesmo utilizado por Miranda (2005) em que consistia: adicionar uma parte da água e a areia na argamassadeira e bater por 30 segundos, esperar por 9,5 minutos a areia absorver uma porção da água, logo após adicionar o cimento e homogeneizar por mais 2 minutos (FIGURA 28). O tempo de descanso permite o agregado absorver uma parte da água evitando a perda rápida de trabalhabilidade, o que poderia mascarar uma consistência errada. Adicionou-se água na argamassa até a mesma alcançar o abatimento almejado.

FIGURA 28 – ARGAMASSADEIRA



FONTE: O autor (2016).

### 3.3.3. Método de dosagem

Para evidenciar as características da areia utilizada na dosagem da argamassa, mediu-se o abatimento de  $300 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$  na mesa de consistência (FIGURA 29), mudando apenas a relação a/c de cada uma.

FIGURA 29 – CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA NA MESA DE CONSISTÊNCIA



FONTE: O autor (2016).

Na TABELA 9 está apresentado os traços, os índices de consistências, o consumo de cimento e o total de finos  $< 75 \mu\text{m}$  de cada amostra.

TABELA 7 – TRAÇO, ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA, CONSUMO DE CIMENTO E TOTAL DE FINOS  $< 75 \mu\text{m}$  DAS ARGAMASSAS

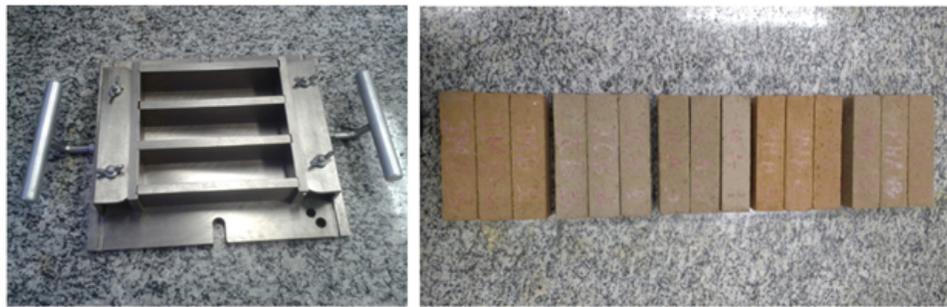
	Traço			Índice de consistência (mm)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Total de finos $< 75 \mu\text{m}$ (%)
	Cimento	Areia	a/c			
<b>ICA</b>	1	7	2,22	295	178	24
<b>MCA</b>	1	7	2,06	309	179	22
<b>IMA</b>	1	7	2,25	292	183	30
<b>MMA</b>	1	7	2,19	293	179	23
<b>ICB</b>	1	7	2,13	302	179	20
<b>MCB</b>	1	7	2,13	308	178	20
<b>IMB</b>	1	7	2,32	297	168	25
<b>MMB</b>	1	7	2,44	295	175	22

FONTE: O autor (2016).

### 3.3.4. Resistência à tração na flexão e na compressão e densidade de massa endurecida

Foram moldados 3 corpos de provas de 4 x 4 x 16 cm de cada amostra que foram desformados após 3 dias e acondicionados em recipientes com água e cal até o dia do rompimento (FIGURA 30). Os resultados apresentados são a média dos 3 corpos de prova de cada amostra.

FIGURA 30 – (A) FORMA PARA CORPOS DE PROVAS 4 X 4 X 16. (B) CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



(A)

(B)

FONTE: O autor (2016).

Aos 28 dias retiraram-se os corpos de prova do meio saturado de cal e no estado saturado e superfície seca mediu-se a densidade no estado endurecido. Para cálculo da densidade no estado endurecido pesaram-se os corpos de provas e retiraram-se as suas medidas. Em uma prensa EMIC, DL-10000, com carga máximo de 100 kN (FIGURA 31), rompeu-se primeiramente os 3 corpos de prova à resistência à tração na flexão (3 resultados), gerando duas metades e posteriormente rompeu-se cada metade à resistência à compressão resultando seis resultados.

FIGURA 31 – (A) PRENSA EMIC ROMPIMENTO À TRAÇÃO NA FLEXÃO. (B) À COMPRESSÃO



(A)

(B)

FONTE: O autor (2016).

### 3.3.5. Retração de secagem

Para o ensaio de retração foram moldados 3 corpos de provas por traço, com formado 2,5 x 2,5 x 16 cm. Foram desformados após 3 dias e depois mantidos em câmara seca por 28 dias em temperatura 24°C e umidade do ar 52,5% (FIGURA 32).

FIGURA 32 – (A) FORMAS PARA CORPOS DE PROVA DE RETRAÇÃO. (B) CORPOS DE PROVA DE RETRAÇÃO DE SECAGEM



(A)

(B)

FONTE: O autor (2016).

As medições começaram no dia da desforma dos corpos de provas, através de um aparelho comparador conforme FIGURA 33.

FIGURA 33 – (A) CALIBRAÇÃO PARA MEDIÇÃO. (B) MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO DE SECAGEM



(A)

(B)

FONTE: O autor (2016).

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados da caracterização das oito amostras coletadas estão apresentados no item 4.1, assim como os resultados e as análises do desempenho das argamassas de revestimento no estado fresco e endurecido estão nos itens 4.2 e itens 4.3 respectivamente. Os resultados para cada ensaio e as análises estatísticas estão anexados ao fim do trabalho.

##### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a apresentação dos resultados da caracterização das amostras foi elaborada a TABELA 8, na qual os resultados para cada parâmetro estão divididos por amostra, tanto para a amostragem A quanto para B. As curvas granulométricas foram apresentadas no item 4.1.1.

A TABELA 8 tem por função auxiliar a interpretação correlacionada dos resultados, mas cada parâmetro foi descrito individualmente nos capítulos a seguir.

TABELA 8 – RESUMO DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

		ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
<b>Passante #4,8 mm (em relação à amostra total britada)</b>	(%)	28	13	53	39	29	11	59	29
<b>Arredondamento</b>	-	0,51	0,51	0,57	0,54	0,52	0,46	0,48	0,51
<b>Esfericidade</b>	-	0,40	0,44	0,46	0,40	0,30	0,26	0,20	0,37
<b>Índice de forma - agregado miúdo</b>	-	1,7	1,7	1,5	1,6	1,6	1,7	1,5	1,6
<b>Material passante na peneira 75 µm</b>	(%)	14	11	21	13	9	9	15	11
<b>Absorção de água - Micro-ondas</b>	(%)	15,9	12,4	14,3	13,0	13,4	11,6	18,3	15,7
<b>Absorção de água - NBR NM 30</b>	(%)	9,5	8,2	7,5	5,3	6,8	6,1	8,4	7,9
<b>Absorção de água - NBR NM 30 (sem material &lt; 75 µm)</b>	(%)	7,5	6,9	6,1	4,8	5,8	5,8	7,8	7,6
<b>Massa unitária</b>	(g/cm <sup>3</sup> )	1,25	1,28	1,20	1,25	1,31	1,33	1,20	1,21
<b>Massa específica</b>	(g/cm <sup>3</sup> )	2,61	2,53	2,52	2,38	2,54	2,51	2,50	2,44
<b>Massa específica aparente</b>	(g/cm <sup>3</sup> )	2,09	2,09	2,12	2,12	2,17	2,18	2,07	2,05
<b>Índice de vazios</b>	-	1,09	0,98	1,09	0,91	0,95	0,89	1,08	1,02

FONTE: O autor (2016).

##### 4.1.1. Curvas granulométricas

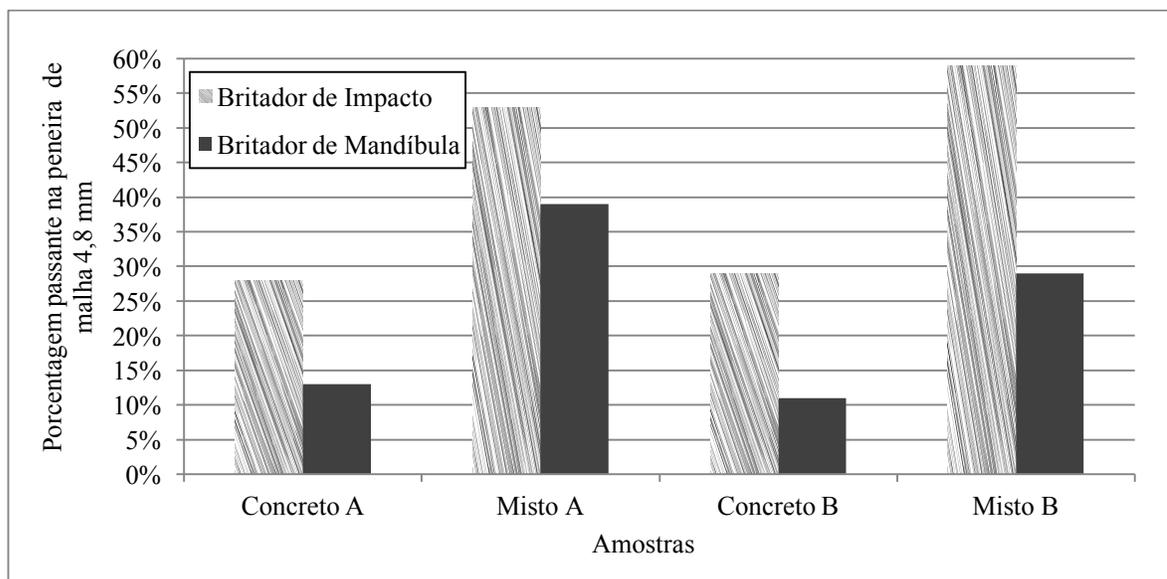
Durante o processo de britagem de RCD foram gerados materiais graúdos e miúdos. Apesar desta pesquisa estar focada apenas na fração miúda, sabe-se que, do total de RCD reciclado, a amostra IMB apresentou 59% passante na peneira 4,8mm e a amostra MCB apenas 11%,

indicando a influência da natureza do material e do tipo de britador na distribuição granulométrica. Já a FIGURA 34 comprova que o britador de mandíbulas produz uma quantidade bem inferior de agregado miúdo que o de impacto, o que já era de se esperar.

A porcentagem baixa de material  $< 4,8\text{mm}$  foi um limitante para execução dos ensaios desse trabalho uma vez que, ao final de alguns ensaios, essa fração de material era descartada limitando assim a repetitividade dos ensaios subsequentes. Para as usinas de reciclagem, a baixa quantidade de material menor que  $4,8\text{ mm}$  evidencia a dificuldade de produção dessa fração em grandes volumes, principalmente quando se trata de resíduos de concretos reciclados em britadores de mandíbula.

De forma geral, as amostras de origem mista obtiveram valores maiores de fração  $< 4,8\text{ mm}$  que as de origem de concreto, independente do britador.

FIGURA 34 – MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA DE ABERTURA 4,8 MM PARA CADA AMOSTRA, SEPARADAS POR BRITADORES



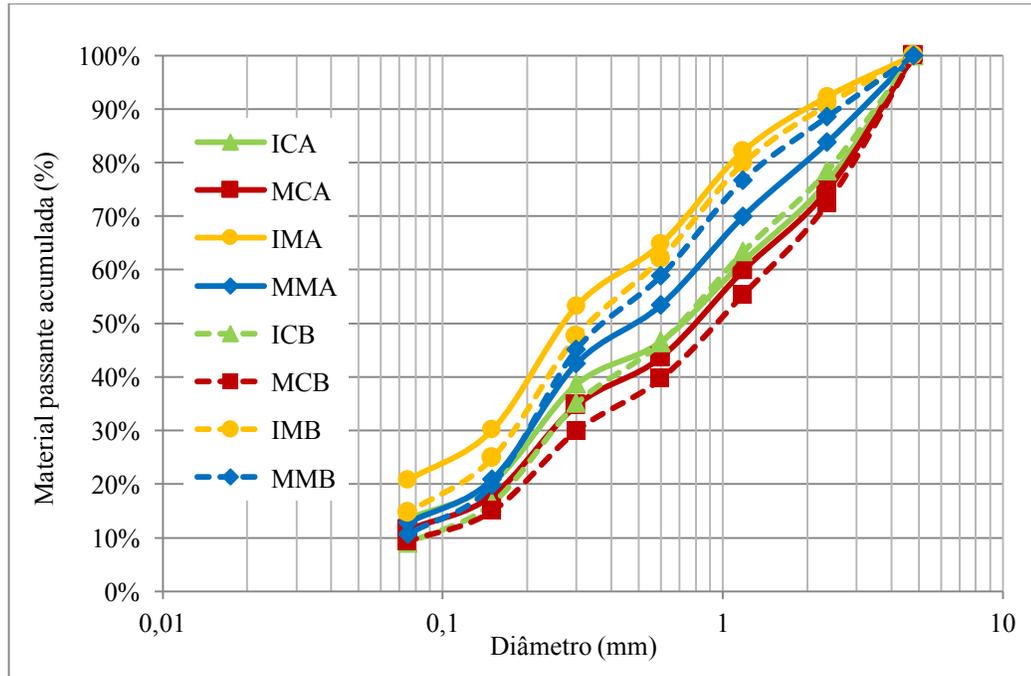
FONTE: O autor (2016).

Ainda tratando da granulometria das amostras, fizeram-se as distribuições granulométricas passantes acumuladas dos agregados, representadas na FIGURA 35.

Entre as curvas granulométricas existiu uma tendência de comportamento devido à natureza dos materiais, onde as amostras derivadas de concreto apresentaram curvas mais grossas do que as amostras de origem mista. Na amostragem A houve diferença entre as curvas

granulométricas para os materiais de origem mista, em contrapartida essa diferença granulométrica na amostragem B ocorreu nos materiais de origem de concreto.

FIGURA 35 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA PASSANTE ACUMULADA DAS AMOSTRAS DE AGREGADO MIÚDO



FONTE: O autor (2016).

De forma mais detalhada, as características das curvas granulométricas podem ser analisadas através do módulo de finura (TABELA 9).

TABELA 9 – MÓDULO DE FINURA DAS AREIAS

	ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
<b>Módulo de finura</b>	3,95	4,03	3,30	3,62	3,85	4,17	3,26	3,35

FONTE: O autor (2016).

Os britadores se diferenciaram quanto ao módulo de finura porque o britador de impacto, com valores menores para esse módulo, gerou um material mais fino que o de mandíbula. Ou seja, pode-se afirmar que existe diferença de granulometria entre os materiais produzidos em britadores de mandíbula e impacto, sendo que neste segundo o material apresenta-se mais fino.

O material mais grosso produzido pela mandíbula poderia ser utilizado para executar emboço em obra, mas que poderia inviabilizar uma massa única, sendo necessário neste caso

peneirar o material em uma peneira de abertura 2,4 ou 1,2 mm para se obter uma fração mais fina e um acabamento do revestimento mais liso.

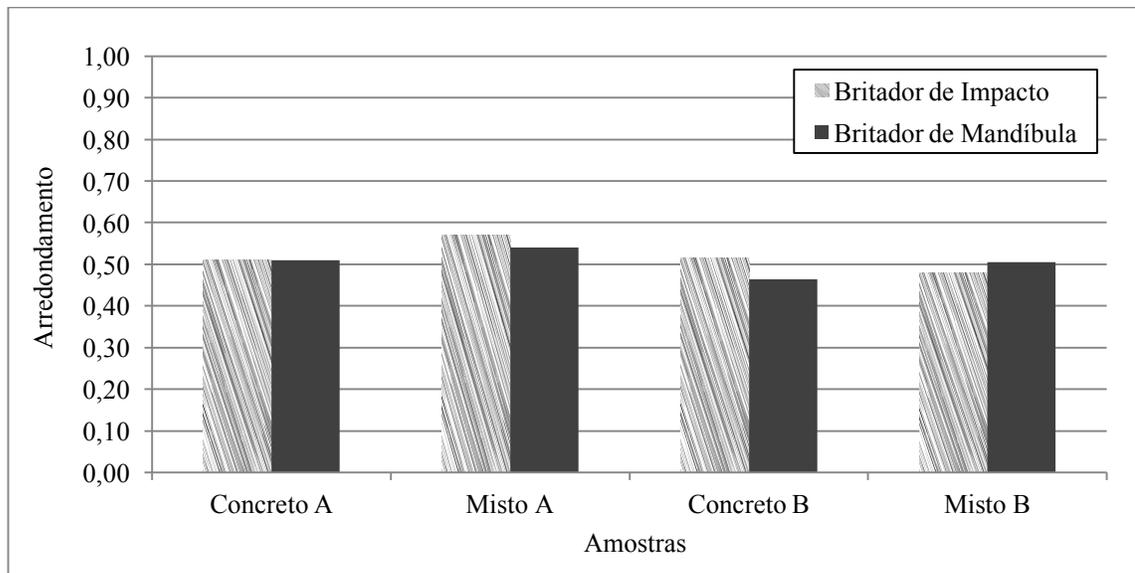
#### 4.1.2. Forma dos grãos

Para a verificação de diferença entre as amostras (origem concreto e mista) e também entre os britadores foi feito um estudo estatístico através da ANOVA e Teste-t (APÊNDICE B).

O comportamento dos britadores em relação ao arredondamento não se manteve igual nas amostras A e B. Nas amostras A de concreto estatisticamente não houve diferença entre os britadores e, na fração mista, o de mandíbula gerou um arredondamento menor que o de impacto.

Já na amostragem B, o comportamento foi diferente entre os equipamentos de britagem: nas amostras de concreto o maior valor de arredondamento foi para o britador de impacto e nas amostras mistas a mandíbula produziu o maior arredondamento (FIGURA 36). Valores mais próximos de 1 para esse parâmetro representam grãos mais arredondados. Ou seja, apesar do Teste-t ter indicado que existia diferença estatística em três das quatro combinações analisadas, não houve um comportamento homogêneo dos resultados, onde em um momento o britador de impacto apresentou maior arredondamento e em outro foi o britador de mandíbula. Portanto, não foi possível afirmar que um britador produz materiais mais arredondados que o outro.

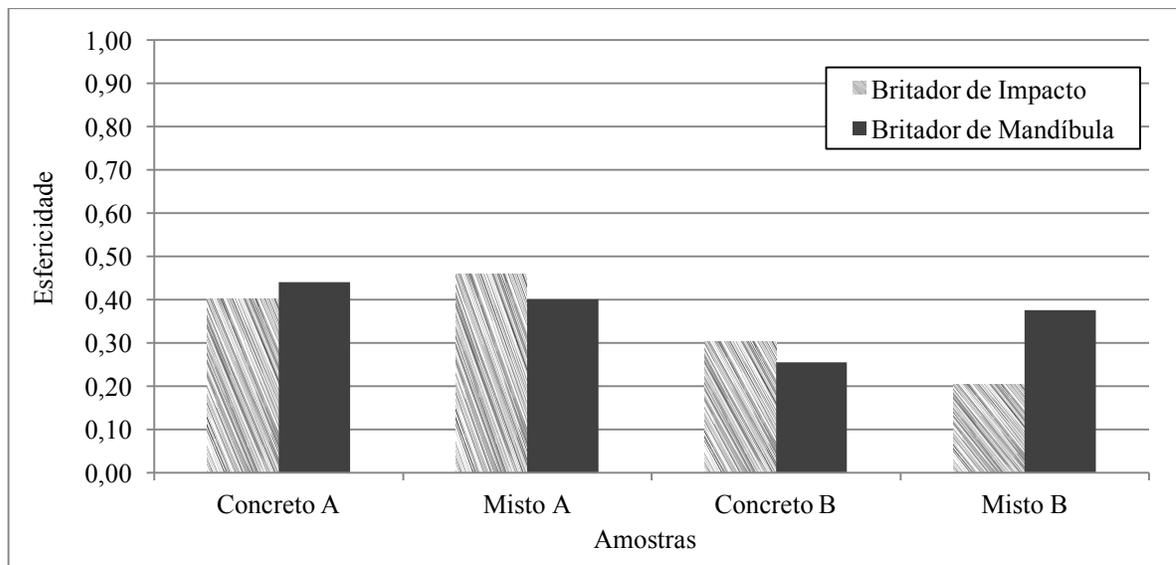
FIGURA 36 – ARREDONDAMENTO DE CADA AMOSTRA



FONTE: O autor (2016).

Em relação à esfericidade, o teste ANOVA indicou que houve diferença quanto ao tipo de britador. Entretanto, não foi observado um comportamento homogêneo nos resultados. Nas amostras A de concreto a maior esfericidade foi encontrada no britador de mandíbula, fato que se inverteu nas amostras A mistas. Na amostragem B a maior esfericidade para o britador de impacto ocorreu na amostra de concreto, quando que para a mandíbula isso ocorreu no agregado misto (FIGURA 37). Como no arredondamento, onde valores perto de 1 significam grãos mais arredondados, valores perto de 1 na esfericidade significam grãos mais esféricos.

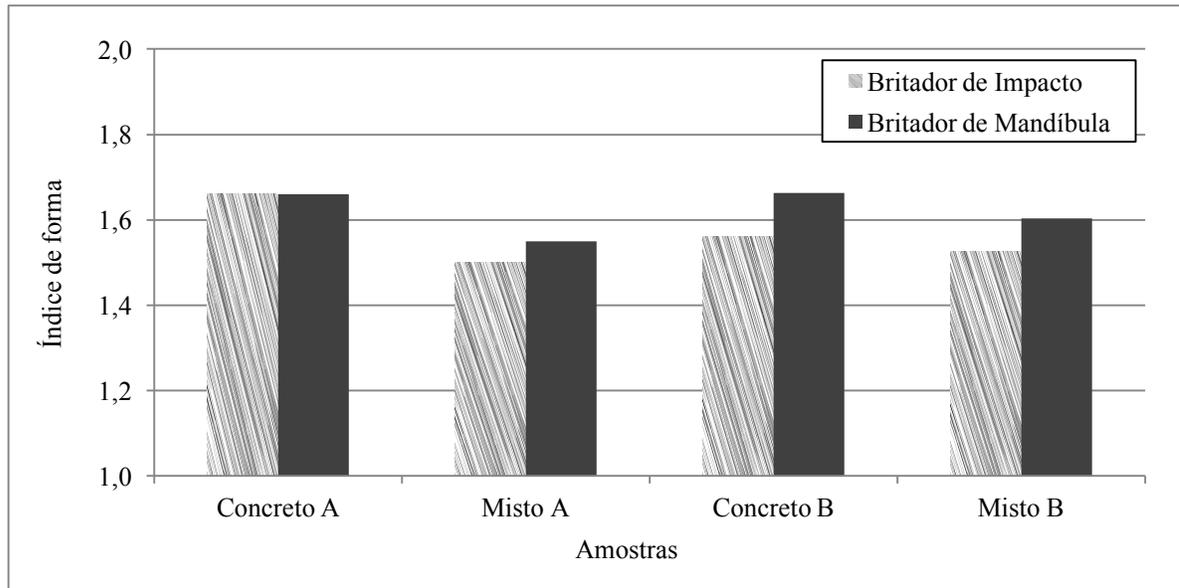
FIGURA 37 – ESFERICIDADE DE CADA AMOSTRA



FONTE: O autor (2016).

Os índices de forma dos agregados das amostras A não sofreram influência dos britadores analisando os materiais concreto e misto separadamente, diferente do que foi apresentado pelo resultado do teste ANOVA e Teste-t da amostra B. Como as amostras B possuíram índices de forma muito próximos e as amostras A não apresentaram diferença estatística, não houve influência do tipo de britador no índice de forma do agregado (FIGURA 38).

FIGURA 38 – ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS MIÚDOS



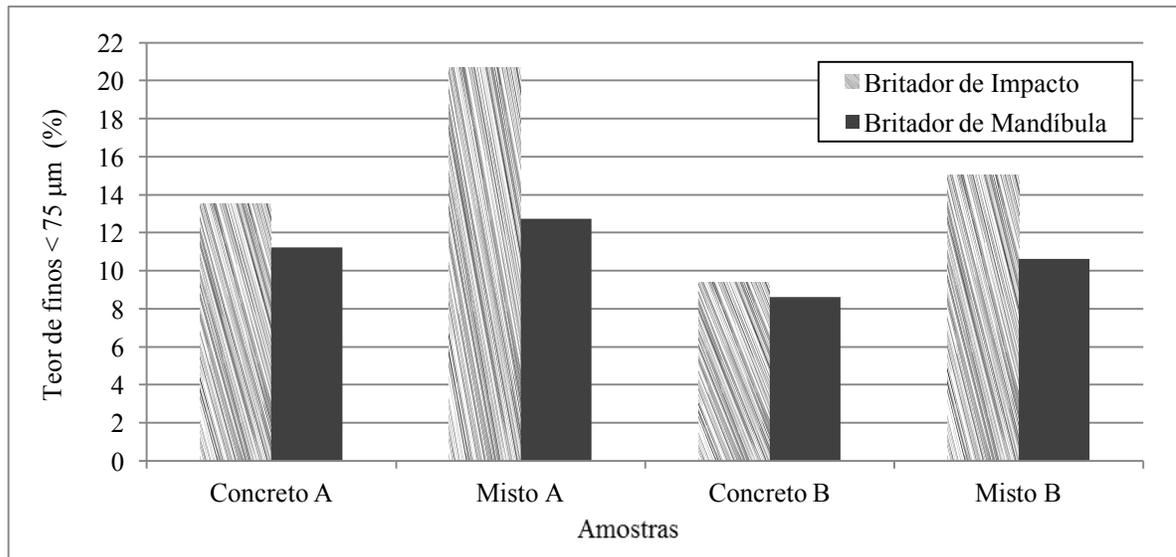
FONTE: O autor (2016).

Pode-se afirmar que não foi identificada influência do tipo de britador na forma dos agregados e as variações obtidas devem estar relacionadas à natureza do RCD.

#### 4.1.3. Teor de finos < 75 µm e absorção de água

As médias dos resultados dos ensaios de material passante na peneira de abertura 75 µm estão apresentadas na FIGURA 39. Já os resultados individuais e cálculos estatísticos estão apresentados no APÊNDICE C.

O britador de impacto gerou maior teor de material passante na peneira 75 µm em três das quatro combinações entre amostras, apenas a amostra de concreto do lote B não apresentou diferença significativa entre os britadores. A maior diferença (8%) entre o britador de impacto e de mandíbula se deu nas amostras de origem mista do lote A. Em relação à origem dos agregados, pode-se perceber que tanto no lote A e quanto no B, o teor de material < 75 µm sempre foi maior nas amostras de natureza mista.

FIGURA 39 – TEOR DE FINOS < 75  $\mu\text{m}$  DAS AMOSTRAS

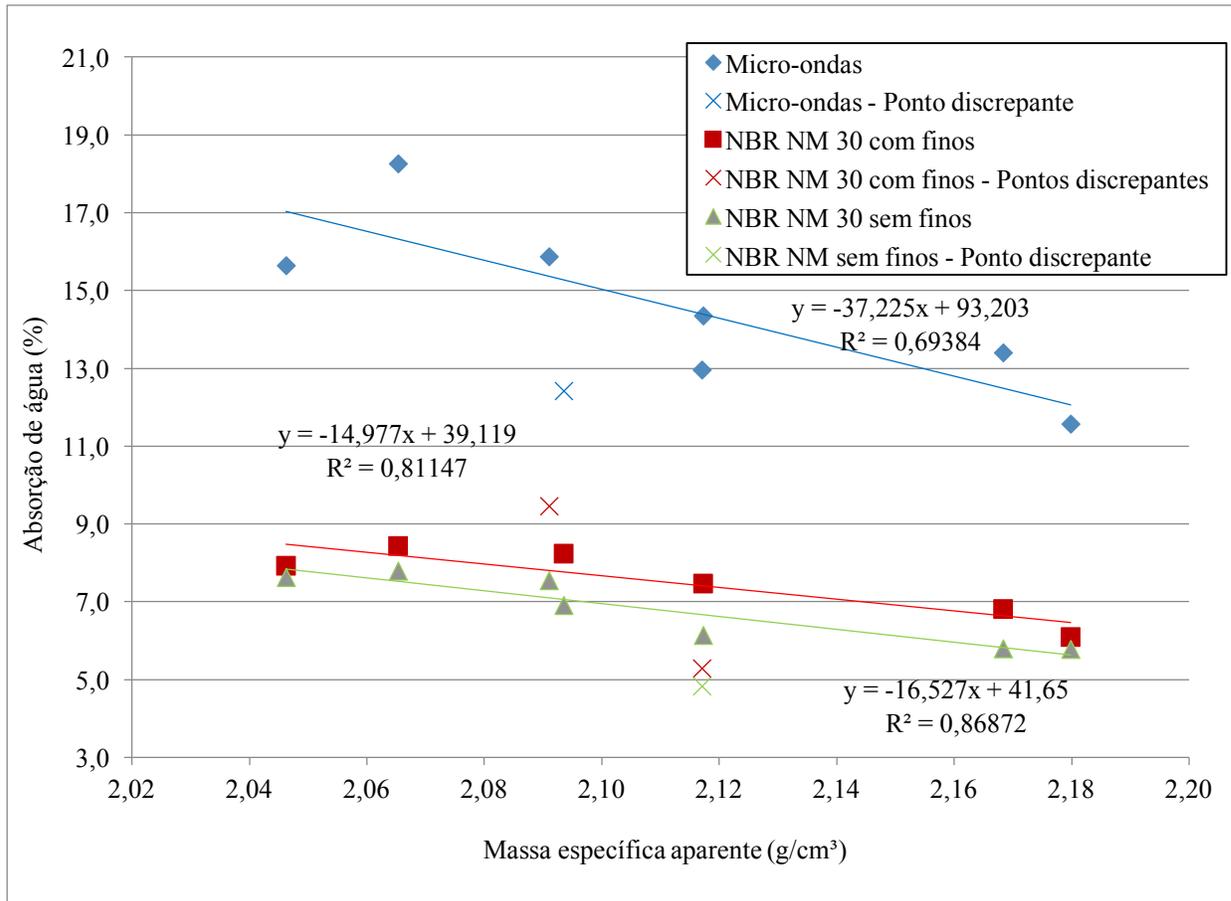
FONTE: O autor (2016).

A absorção de água dos agregados foi determinada seguindo três metodologias de ensaio: através do forno micro-ondas, seguindo a NBR NM 30 (ABNT, 2001) com material menor que 75  $\mu\text{m}$  e também seguindo a mesma norma mas removendo-se a fração < 75  $\mu\text{m}$ . Os gráficos individuais do ensaio de absorção por micro-ondas estão no APÊNDICE D e os resultados individuais de absorções NBR NM 30 (ABNT, 2001) e estudo estatístico no APÊNDICE E.

A fim de analisar as metodologias utilizadas para medição da absorção, elas foram correlacionadas com a massa específica aparente (FIGURA 40), cujos resultados individuais estão apresentados no APÊNDICE E.

Os resultados de absorção diminuíram com o aumento da massa específica aparente e foram maiores no britador de impacto. Todas as amostras apresentaram maior absorção no ensaio no micro-ondas quando comparadas aos outros métodos, o que deve ter ocorrido devido ao método de saturação a vácuo conseguir forçar a entrada de água nos poros, enquanto que no método da NBR NM 30 (ABNT, 2001) isto não ocorre, pois o material apenas fica submerso em água por 24 horas. O ensaio de absorção pela NBR NM 30 (ABNT, 2001) com finos resultou em uma absorção maior que a sem finos, o que pode indicar uma porosidade total maior desta fração fina e pouca influência do efeito de coesão que estes grãos poderiam causar.

FIGURA 40 – ABSORÇÃO DAS AMOSTRAS E MASSA ESPECÍFICA APARENTE

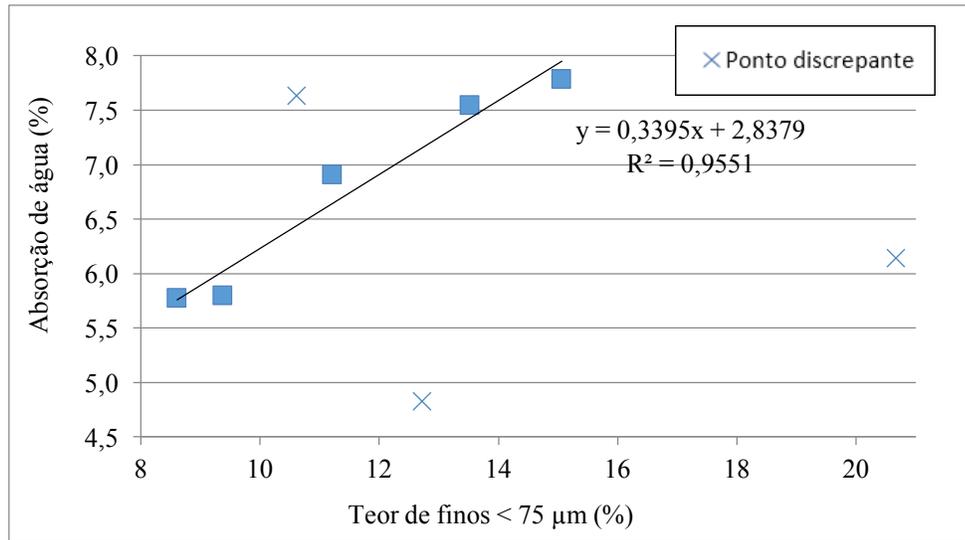


FONTE: O autor (2016).

Os resultados pelo método NBR NM 30 (ABNT, 2001) sem material passante na peneira 75  $\mu\text{m}$  resultaram em uma reta com maior  $R^2$ . Por isso adotou-se os resultados deste método como a absorção de água das amostras. Foram realizadas quatro repetições de cada amostra, não havendo diferença significativa entre britadores em nenhuma das combinações.

A absorção de água foi relacionada com o aumento do material passante na peneira 75  $\mu\text{m}$ , conforme FIGURA 41.

FIGURA 41 – ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75 µm

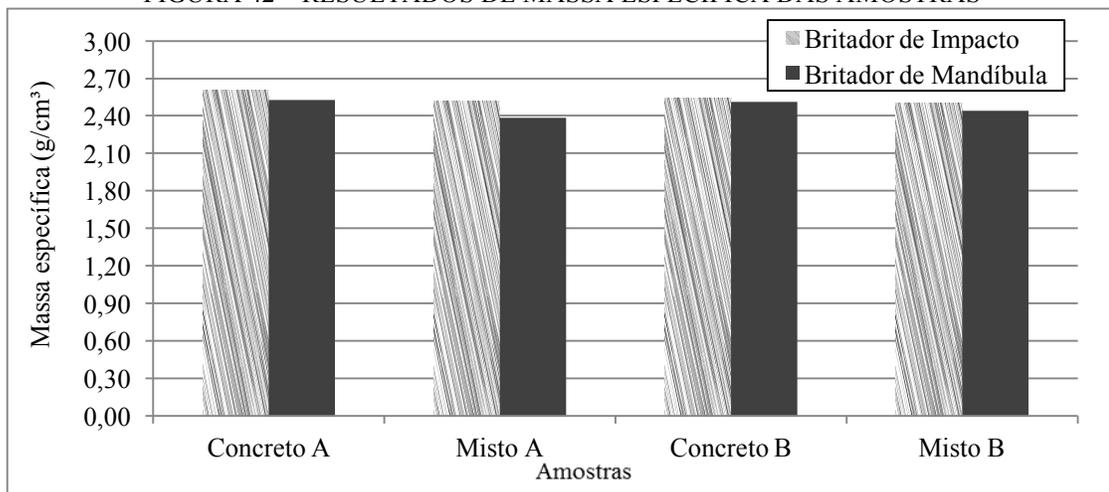


FONTE: O autor (2016).

#### 4.1.4. Massa específica, massa unitária e índice de vazios

O maior resultado de massa específica foi da amostra ICA com 2,61 g/cm<sup>3</sup> e o menor da amostra MMA com 2,38 g/cm<sup>3</sup> (FIGURA 42). O britador de impacto resultou em maiores massas específicas em todas as combinações, porém a variação foi insignificante. Apesar de não ter sido possível realizar uma análise estatística dos dados, não houve diferenças entre os britadores, uma vez que a massa específica é uma propriedade que depende da natureza do material e não da porosidade intrínseca.

FIGURA 42 – RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA DAS AMOSTRAS

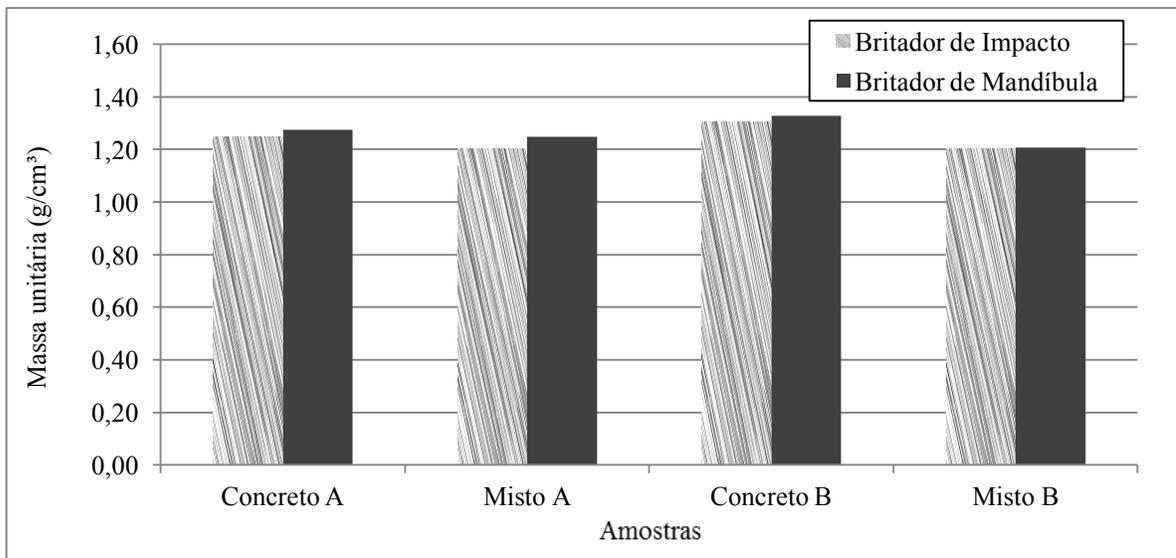


FONTE: O autor (2016).

Ao contrário da massa específica, a massa unitária apresentou valores maiores para o britador de mandíbula em todas as amostras (FIGURA 43), porém não se pode afirmar que o tipo de britador causou influência significativa na massa unitária das amostras.

Considerando que a massa unitária dos materiais depende de sua massa específica e dos vazios intra e intergranulares, a menor massa específica das amostras britadas em britador de mandíbula pode ter sido compensada com a menor absorção de água de tais agregados e, portanto, menos vazios intragranulares, e por uma curva granulométrica com coeficiente de uniformidade igual ou ligeiramente superior aos dos agregados reciclados britados em britadores de impacto, podendo gerar menos vazios intergranulares, resultando assim em massas unitárias ligeiramente superiores.

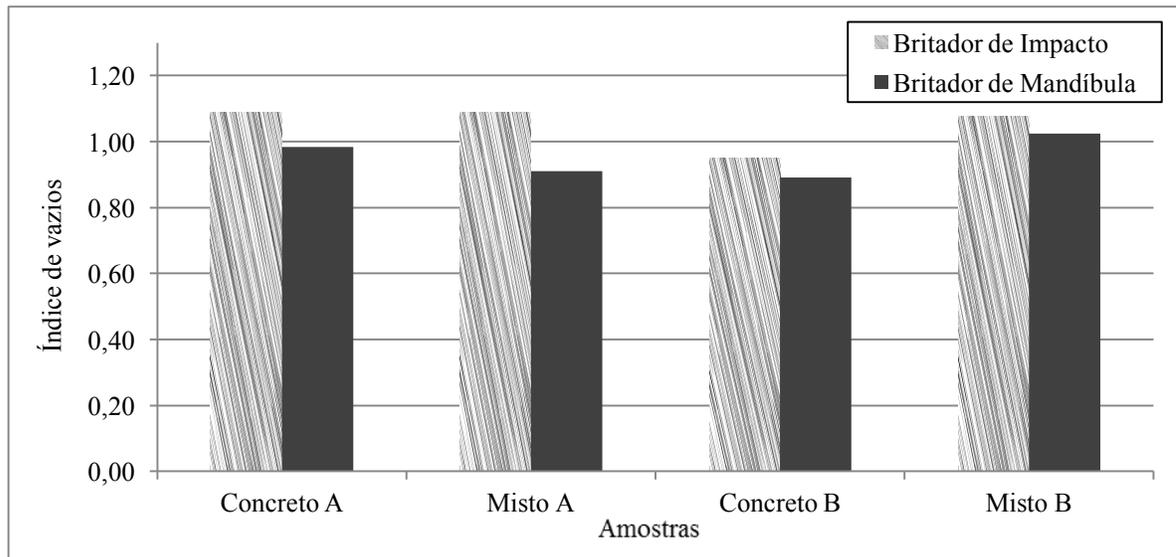
FIGURA 43 – RESULTADOS DE MASSA UNITÁRIA



FONTE: O autor (2016).

Os índices de vazios das amostras do A e B processadas no britador de mandíbula e no de impacto podem ser vistos na FIGURA 44.

FIGURA 44 – ÍNDICE DE VAZIOS DAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2016).

Todas as amostras do britador de impacto resultaram em maiores índices de vazios quando comparado com o britador de mandíbula, sendo a amostra ICA com 1,09 o maior resultado. A principal razão disto é a maior massa unitária das amostras recicladas no britador de mandíbulas, que possuem menor absorção de água provavelmente pela menor liberação de argamassa aderida ao agregado graúdo. No APÊNDICE E e no APÊNDICE F estão apresentados os resultados individuais das repetições dos ensaios respectivamente citados.

#### 4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

As relações a/c e as densidades das argamassas no estado fresco das amostras, respeitando o abatimento estipulado de  $300 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$  e consumo de cimento aproximadamente de  $170 \text{ kg/m}^3$ , estão apresentadas na TABELA 10.

TABELA 10 – DENSIDADE NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS

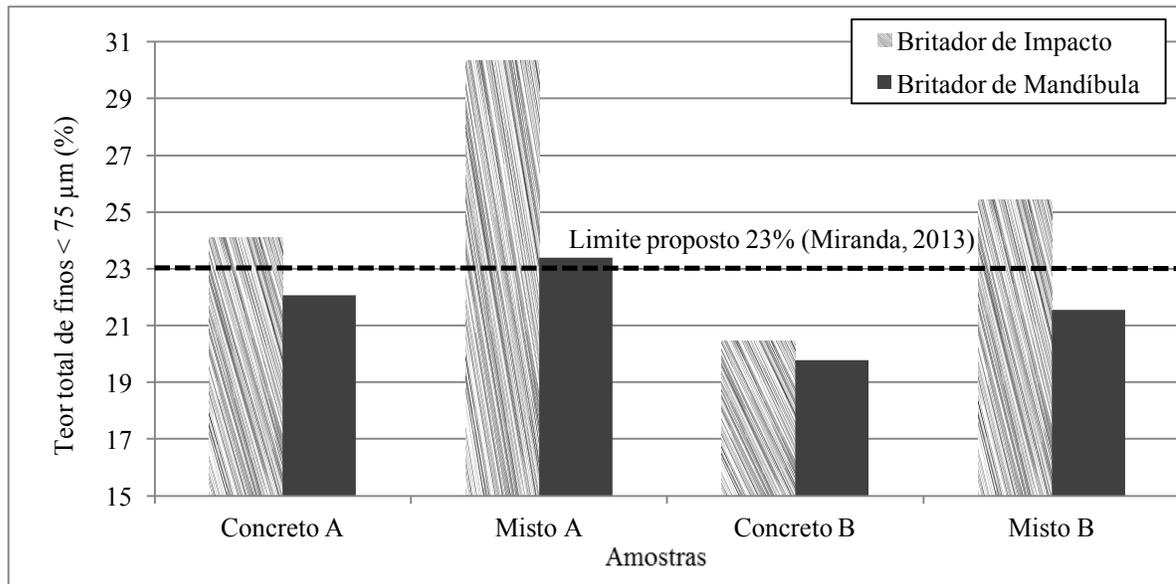
<b>Densidade da argamassa no estado fresco</b>	
<b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	
<b>ICA</b>	1,82
<b>MCA</b>	1,80
<b>IMA</b>	1,88
<b>MMA</b>	1,83
<b>ICB</b>	1,81
<b>MCB</b>	1,80
<b>IMB</b>	1,73
<b>MMB</b>	1,83

FONTE: O autor (2016).

#### 4.2.1. Teor total de finos < 75 µm

O teor total de finos < 75 µm contempla o material oriundo da areia reciclada e do cimento de acordo com o traço da argamassa, sendo esse definidor para o nível de fissuração das argamassas. Miranda (2013) propôs um limite de 23% para evitar o início de fissuração em argamassas de revestimento e suficiente para garantir uma boa trabalhabilidade. Na FIGURA 45 é possível visualizar as amostras que ultrapassaram o valor recomendado.

O britador de impacto resultou em maiores teores em todas as amostras comparadas com a do britador de mandíbula, sendo a amostra IMA com 30% o valor máximo encontrado e a MCB com 20% o valor mínimo. Nas amostras do britador de impacto apenas a ICB se manteve abaixo dos 23%, já nas do britador de mandíbula apenas a amostra MMA ficou superior à recomendada, o que indica o melhor desempenho do britador de mandíbula em produzir areias para argamassas dentro do limite recomendado para controle da fissuração.

FIGURA 45 – RESULTADOS DOS TEORES TOTAIS DE FINOS < 75  $\mu$ M

FONTE: O autor (2016).

#### 4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados em valores médios das propriedades do estado endurecido das argamassas estão apresentados na TABELA 11.

TABELA 11 – RESUMO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

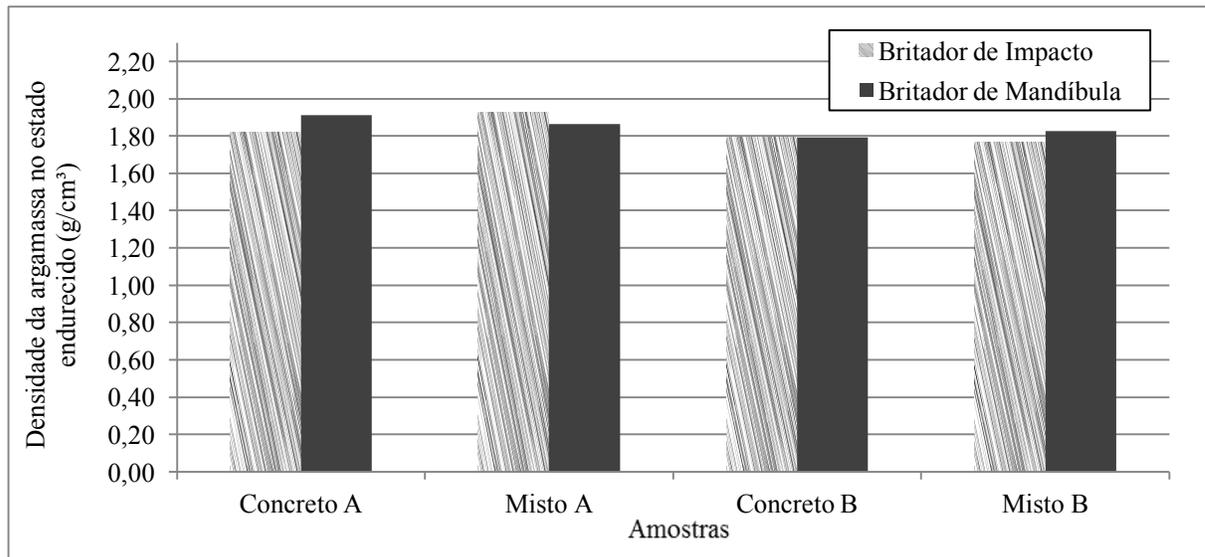
		ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
<b>Densidade da argamassa no estado endurecido</b>	(g/cm <sup>3</sup> )	1,82	1,91	1,92	1,87	1,79	1,79	1,77	1,83
<b>Resistência à tração na flexão</b>	(MPa)	1,47	2,23	1,94	1,84	1,61	1,55	1,5	1,71
<b>Resistência à compressão</b>	(MPa)	3,23	6,70	5,33	5,59	3,67	3,49	3,92	4,97
<b>Retração aos 28 dias</b>	(%)	-0,26	-0,21	-0,24	-0,23	-0,18	-0,13	-0,23	-0,29

FONTE: O autor (2016).

##### 4.3.1. Densidade da argamassa no estado endurecido

A densidade no estado endurecido foi medida com o corpo de prova saturado com superfície seca, resultando no valor máximo a amostra IMA com 1,92 g/cm<sup>3</sup> e no valor mínimo a amostra IMB com 1,77 g/cm<sup>3</sup>, conforme FIGURA 46.

FIGURA 46 – DENSIDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO



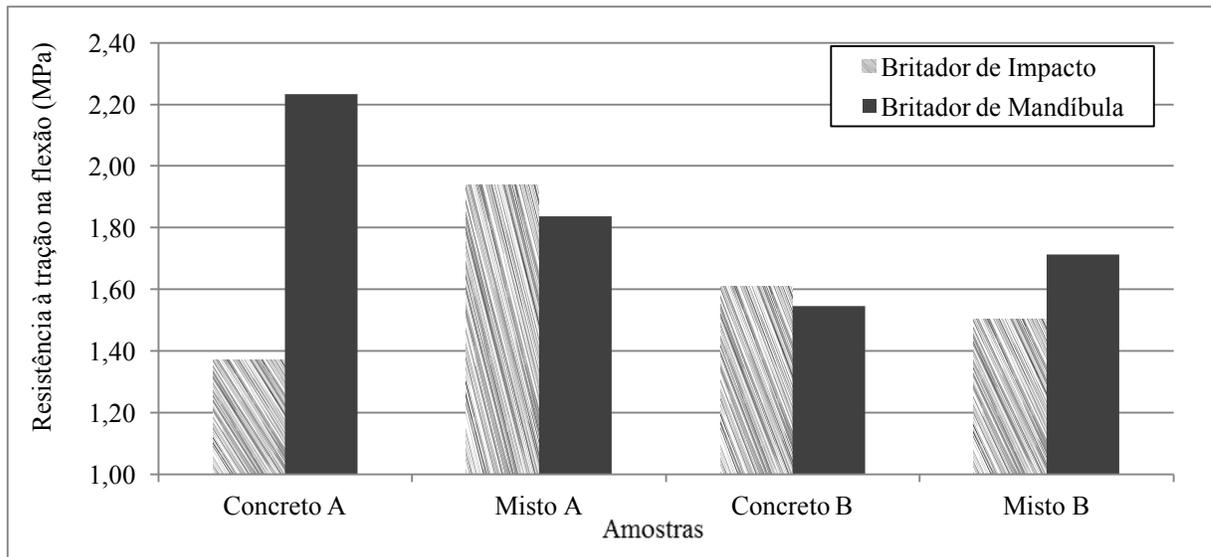
FONTE: O autor (2016).

As amostras não apresentaram um comportamento que se repetiu entre a amostra A e a amostra B, seja pela natureza do material ou pelo processo de britagem. Não houve diferença do britador de impacto e de mandíbula nessa propriedade.

#### 4.3.2. Resistência à tração na flexão

Na FIGURA 47 apresentam-se os resultados de resistências à tração na flexão. Os britadores se diferenciaram significativamente na amostra de concreto A e na de misto B, uma vez que os agregados britados na mandíbula proporcionaram à argamassa uma maior resistência à tração na flexão.

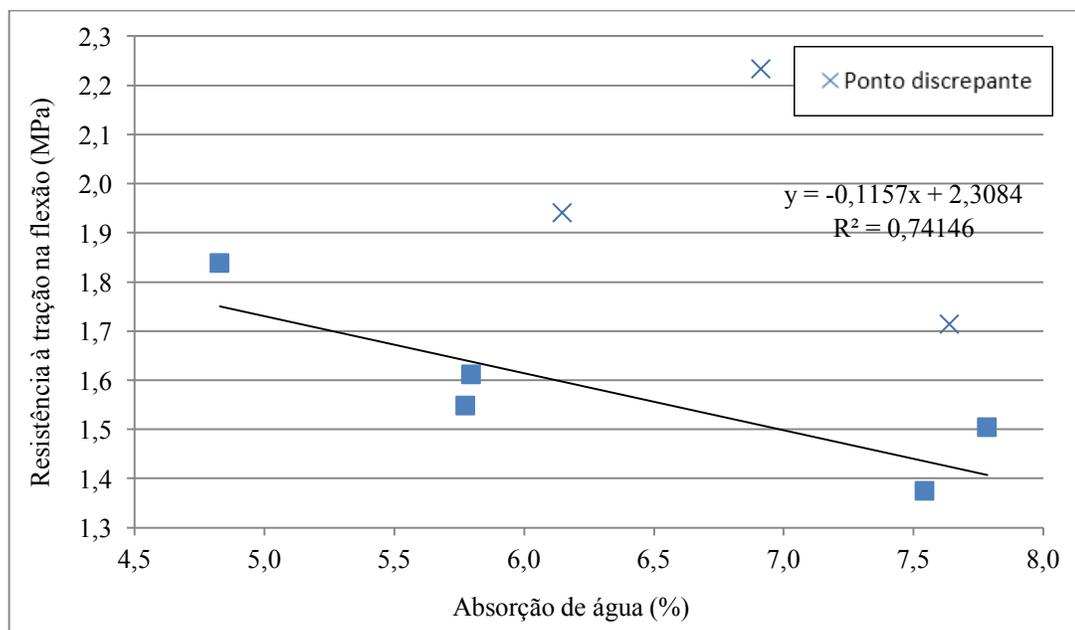
FIGURA 47 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO NAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2016).

As resistências à tração na flexão variaram entre 1,37 MPa e 2,23 MPa, consequência das variações das características das areias recicladas, como por exemplo a absorção. Na FIGURA 48 a resistência à tração diminui com o aumento da absorção de água, devido ao efeito dessa propriedade na relação a/c da argamassa de revestimento.

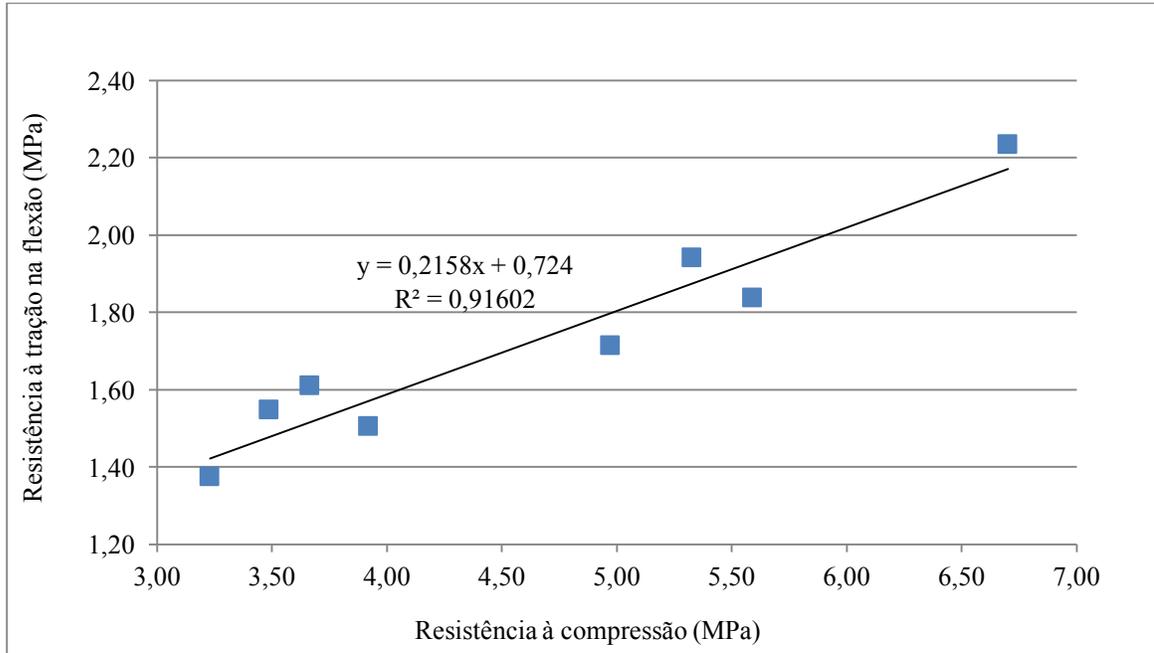
FIGURA 48 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO EM FUNÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA



FONTE: O autor (2016).

Os resultados de tração não apresentaram influência quanto ao tipo de britador, porém como já era esperado, se correlacionaram com a resistência à compressão (FIGURA 49).

FIGURA 49 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

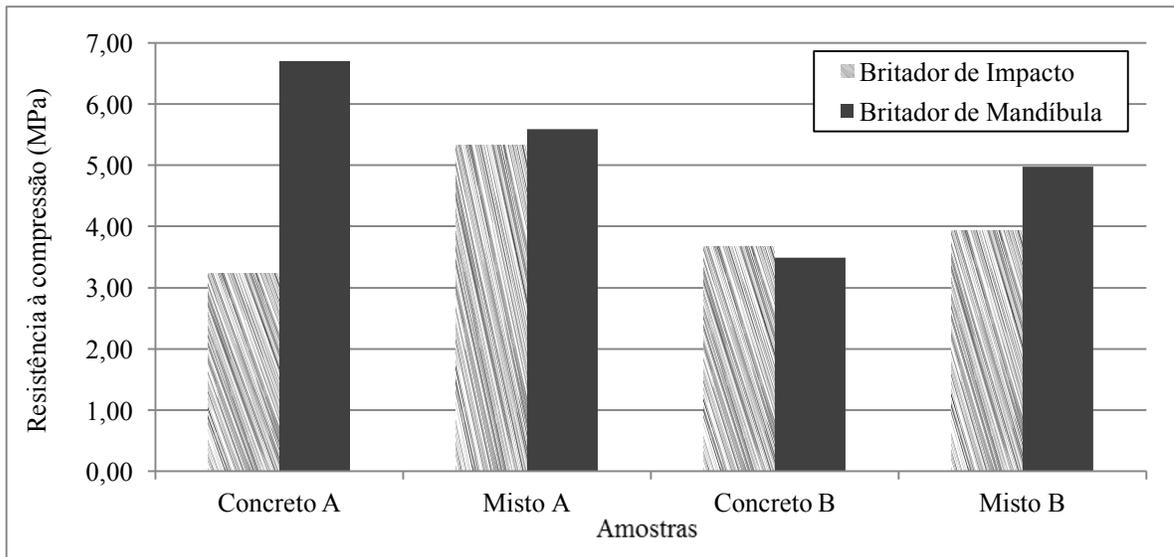


FONTE: O autor (2016).

#### 4.3.3. Resistência à compressão

Os resultados individuais e a análise estatística da resistência à compressão estão no APÊNDICE G deste trabalho e comprovaram que todas as amostras apresentaram diferenças significativas entre os britadores, menos as amostras B de concreto que foram consideradas iguais (FIGURA 50).

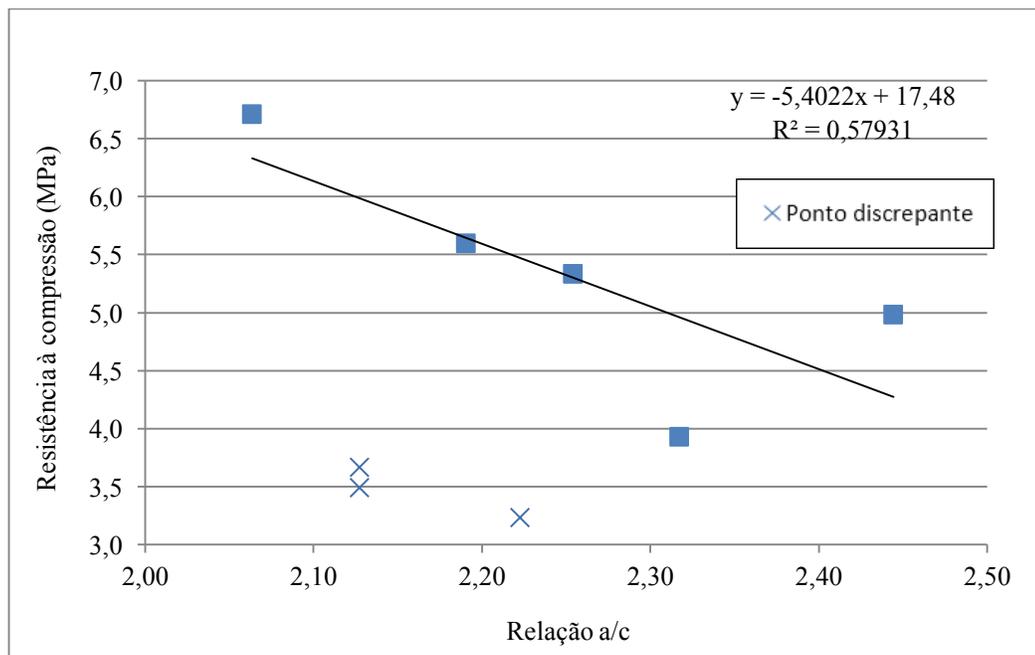
FIGURA 50 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS OITO AMOSTRAS



FONTE: O autor (2016).

Sendo assim, mesmo tendo apresentado um  $R^2$  relativamente baixo, pode-se afirmar que as amostras do britador de mandíbula apresentaram resistência maior ou igual ao do britador de impacto, oriundo da menor relação a/c das argamassas, conforme FIGURA 51.

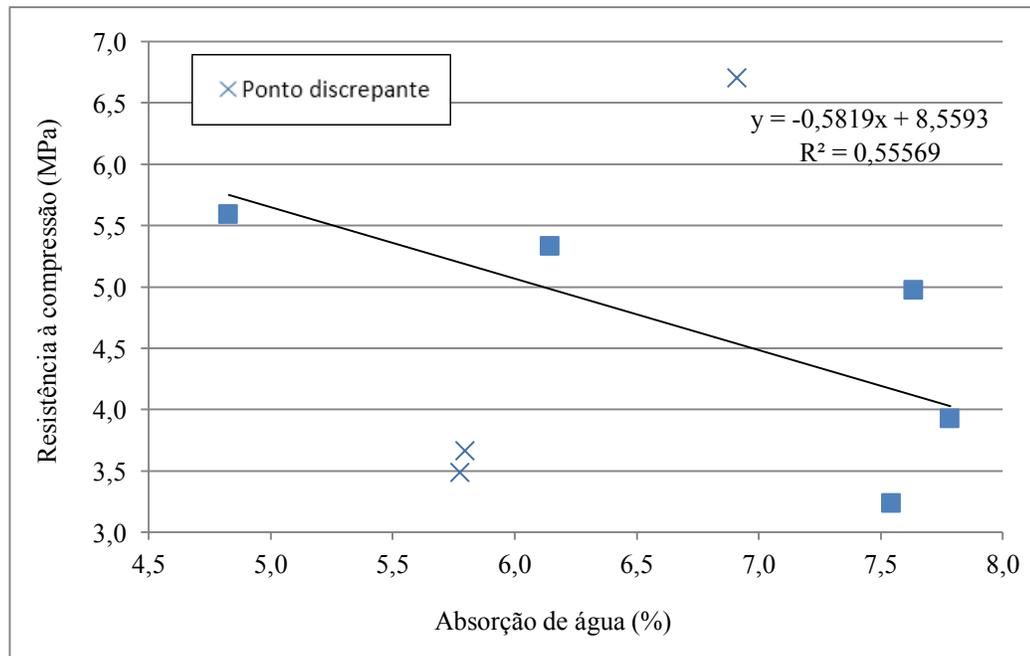
FIGURA 51 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO A/C



FONTE: O autor (2016).

O aumento da absorção de água resultou em uma maior relação a/c, característica que se relacionou diretamente com a resistência à compressão, conforme FIGURA 52.

FIGURA 52 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

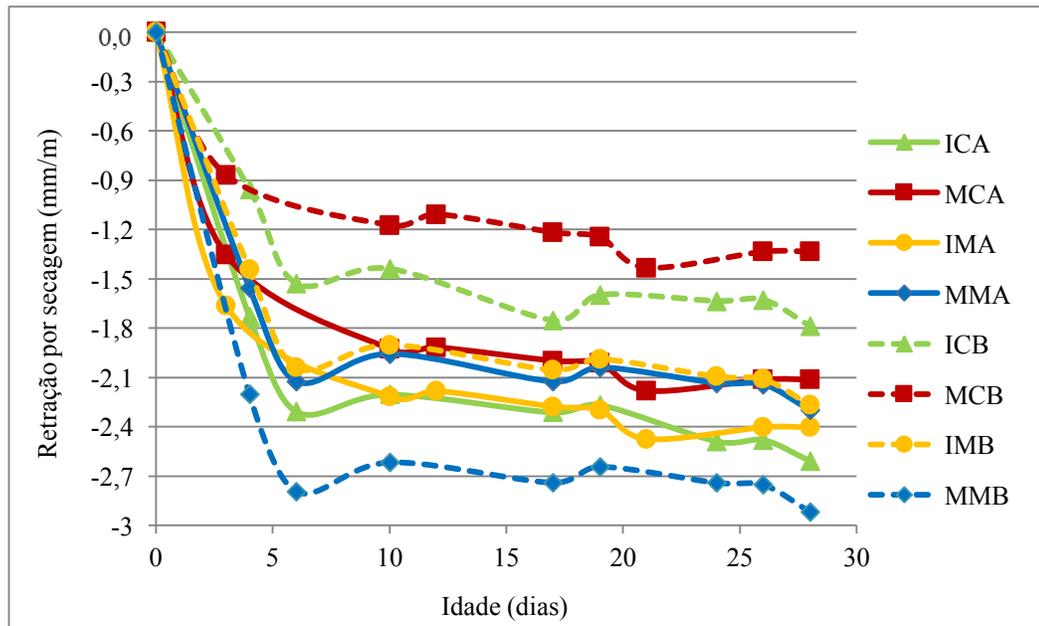


FONTE: O autor (2016).

#### 4.3.4. Retração por secagem

O resumo dos resultados da retração por secagem aos 28 dias está apresentado na TABELA 11. A FIGURA 53 apresenta a retração por secagem das oito amostras em função da idade. A amostra MCB teve menor retração, de -0,13%, e a MMB maior retração, de -0,29%. Das quatro combinações, três tiveram a amostra do britador de mandíbula com menor retração em comparação com a do britador de impacto. Os pontos de retração por secagem apresentados em função da idade sofreram influência por um problema técnico do desumidificador da câmara seca, indicados em alguns intervalos pela pequena expansão das amostras.

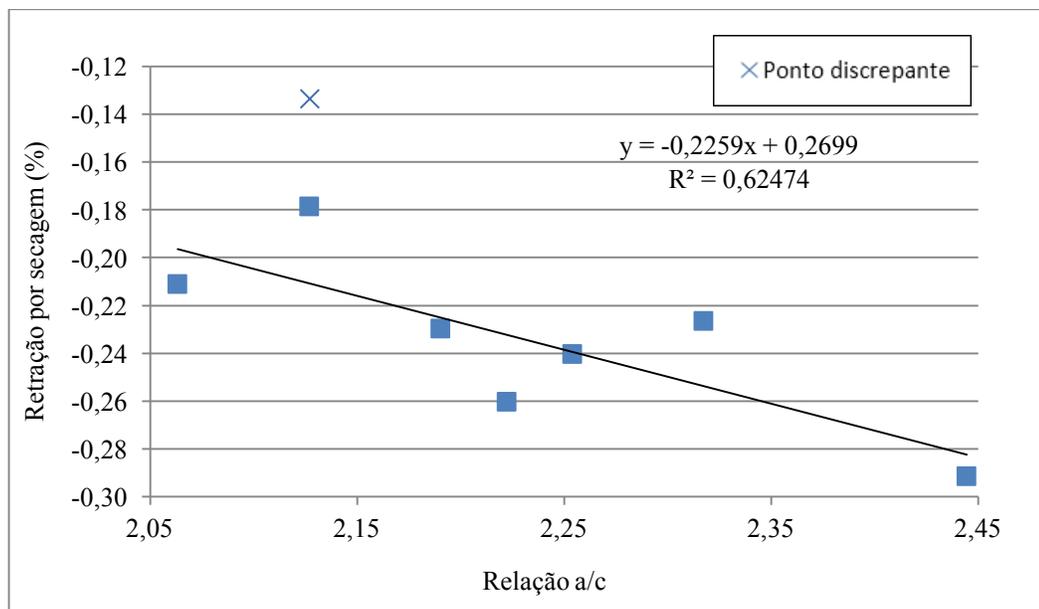
FIGURA 53 – RETRAÇÃO POR SECAGEM EM FUNÇÃO DA IDADE ATÉ OS 28 DIAS



FONTE: O autor (2016).

Assim como a resistência à compressão, a retração por secagem foi influenciada pela relação a/c usada no traço das argamassas. Seu comportamento foi crescente com o aumento da relação a/c, conforme FIGURA 54.

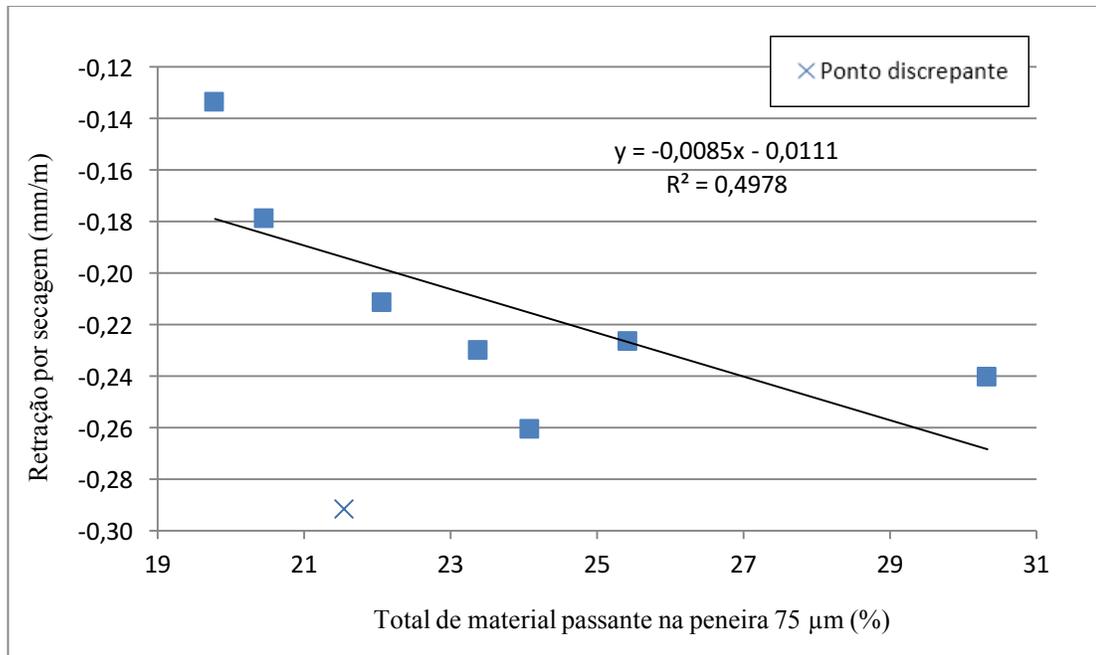
FIGURA 54 – RETRAÇÃO POR SECAGEM AOS 28 DIAS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO A/C



FONTE: O autor (2016).

O teor de finos < 75 µm apresentou influência direta na retração por secagem das argamassas, aumentando a retração com o aumento do teor do mesmo (FIGURA 55). Este fato era esperado, considerando que um teor maior de finos aumenta o consumo de água e reduz o tamanho dos poros da argamassa.

FIGURA 55 – RETRAÇÃO POR SECAGEM AOS 28 DIAS EM FUNÇÃO DO TOTAL DE MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75 µm



FONTE: O autor (2016).

Pode-se afirmar que a retração por secagem das argamassas foi influenciada pelo tipo de britador, demonstrando melhor desempenho das amostras oriundas do britador de mandíbula devido à curva granulométrica mais grossa, menor teor de material passante na peneira 75 µm e menor relação a/c.

#### 4.4. ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA DOS RESULTADOS

Com os resultados obtidos, encontrou-se as principais propriedades que influenciaram a resistência à compressão das argamassas para, então, propor uma equação de reta que explicasse o comportamento de tal propriedade.

Para isto foi feita uma regressão linear múltipla. Selecionou-se a resistência à compressão da argamassa como a variável principal e as variáveis explicativas que tiveram melhores

correlações diretas no capítulo anterior, como: relação a/c, absorção de água e teor total de finos < 75  $\mu\text{m}$ . Os resultados estão apresentados na TABELA 12 e TABELA 13.

TABELA 12 – REGRESSÃO LINEAR – *RESIDUALS*

ICA	MCA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
-0,9157	2,1644	-0,0693	0,1475	-0,922	-1,0292	-0,3321	0,9564

FONTE: O autor (2016).

TABELA 13 – REGRESSÃO LINEAR – *COEFFICIENTS*

	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t value</i>	<i>Pr(&gt; t )</i>
<i>(Intercept)</i>	3,5548	11,3513	0,3130	0,7700
Relação a/c	0,8509	6,3516	0,1340	0,9000
Absorção	-0,5153	0,7104	-0,7250	0,5080
Total < 75 $\mu\text{m}$	0,1074	0,1707	0,6300	0,5630

FONTE: O autor (2016).

RESIDUAL STANDARD ERROR: 1,456 ON 4 DEGREES OF FREEDOM

*Multiple R-squared:* 0,1931, *Adjusted R-squared:* -0,4121

*F-statistic:* 0,3191 on 3 and 4 DF, *p-value:* 0.8125

#### 4.4.1. Teste de *Bonferroni* para *Outliers*

Para que o modelo represente bem todas as variáveis que o influenciaram, vários testes foram feitos para eliminar as amostras discrepantes ou variáveis que não são explicativas. Para determinar a necessidade de exclusão de alguma amostra foi realizado o teste de *Outliers* de *Bonferroni*. Este teste deve ser feito até não haver mais amostras discrepantes (TABELA 14).

TABELA 14 – 1º TESTE DE *BONFERRONI* PARA *OUTLIERS*

<i>rstudent</i>	<i>unadjusted</i>	<i>p-value</i>	Bonferonni p
MCA	27,54917	0,000105	0,00083981

FONTE: O autor (2016).

Houve a necessidade de excluir toda a amostra MCA, posteriormente mais nenhuma amostra foi apontada como discrepante, reduzindo de oito amostras para sete. Após a retirada da amostra foi recalculado a regressão linear, aumentando o  $R^2$  de 0,1931 para 0,994, comprovando que houve alguma discrepância grande nos resultados da amostra MCA (TABELA 15, TABELA 16).

TABELA 15 – REGRESSÃO LINEAR – *RESIDUALS*

ICA	IMA	MMA	ICB	MCB	IMB	MMB
0,0974	0,0145	0,0094	0,0356	-0,0732	-0,1240	0,0403

FONTE: O autor (2016).

TABELA 16 – REGRESSÃO LINEAR – *COEFFICIENTS*

	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t value</i>	<i>Pr(&gt; t )</i>	
<i>(Intercept)</i>	-14,0780	1,0422	-13,5090	0,0009	***
Relação a/c	9,9905	0,5673	17,6100	0,0004	***
Absorção	-1,0447	0,0549	-19,0150	0,0003	***
Total < 75 µm	0,1208	0,0124	9,7610	0,0023	**

FONTE: O autor (2016).

*Signif. Code 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1*

*Residual standard error: 0,1055 on 3 degrees of freedom*

*Multiple R-squared: 0,994, Adjusted R-squared: 0,9879*

*F-statistic: 164,5 on 3 and 3 DF, p-value: 0,000796*

#### 4.4.2. Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*

Determinou-se que o tamanho da amostra foi suficiente para a distribuição ser normal através do teste de normalidade *Shapiro-Wilk*. Caso essa condição não fosse atendida não seria possível fazer os testes de t e F tradicionais, sob pena de aceitarmos H<sub>0</sub> quando ela fosse falsa, ou rejeitar-se H<sub>0</sub> quando ela fosse verdadeira.

H<sub>0</sub>: Distribuição normal

H<sub>a</sub>: Distribuição não-normal

Nível de significância do teste (95% de confiança)

$$W = 0,9287, p\text{-value} = 0,5315$$

Comparando a estatística  $W = 0,9287$  com a estatística tabelada ( $sw = 0,928$ ) conclui-se que a distribuição é normal. Sempre que o valor de W calculado for maior que o valor tabelado a distribuição é normal.

Além do ajuste feito retirando a amostra discrepante, verificou-se a existência de amostras idênticas, ou seja, que explicam igualmente a variável dependente. Assim a multicolinearidade perfeita pode ocorrer apenas entre as variáveis explicativas (TABELA 17, TABELA 18).

TABELA 17 – CORRELAÇÃO *PARTIAL CORRELATIONS*

	Relação a/c	Absorção	Total < 75 µm
Relação a/c	0,00000	0,70838	0,10784
Absorção	0,70838	0,00000	0,08381
Total < 75 µm	0,10784	0,08381	0,00000

FONTE: O autor (2016).

NUMBER OF OBSERVATIONS: 7

TABELA 18 – CORREÇÃO DE *SPEARMAN*

	Relação a/c	Absorção	Total < 75 µm
Relação a/c	1,00000	0,81084	0,59462
Absorção	0,81084	1,00000	0,46429
Total < 75 µm	0,59462	0,46429	1,00000

FONTE: O autor (2016).

Os resultados mostram que não existe nenhuma correlação de nenhuma ordem (simples ou parcial). A existência de correlação é identificada quando algum resultado diferente da diagonal principal é igual a 1 ou -1.

#### 4.4.3. Teste de *Durbin-Watson*

Outra ferramenta para análise das relações entre variáveis é a autocorrelação, capaz de encontrar padrões de repetições. Para isso executou-se o teste de *Durbin-Watson* conforme TABELA 19.

TABELA 19 – AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL

<i>lag</i>	<i>Autocorrelation</i>	<i>D-W Statistic</i>	<i>p-value</i>
1	0,1002765	1,466869	0,064

*Alternative hypothesis: rho != 0*

FONTE: O autor (2016).

Como a estatística D-W é menor que 2, concluiu-se que não existe autocorrelação de primeira ordem. Além de autocorrelação, verificou-se se não havia variáveis que não apresentavam poder explicativo. Isso se deu através do teste de seleção modelos *Stepwise* (TABELA 20, TABELA 21).

*Start:* AIC = - 29,63

Compressão ~ Relação a/c + Absorção + Total < 75 µm

TABELA 20 – TESTE DE SELEÇÃO DO MODELO

	<i>Df</i>	<i>Sum of Sq</i>	<i>RSS</i>	<i>AIC</i>
<none>			0,0334	-29,6316
Total < 75 µm	1	1,0608	1,0942	-7,1536
Relação a/c	1	3,4529	3,4863	0,9583
Absorção	1	4,0258	4,0592	2,0233

FONTE: O autor (2016).

*Call:*

lm(formula = Compressao ~ a.c + Absorcao + Total.0.075mm)

TABELA 21 – TESTE DE SELEÇÃO DO MODELO – *COEFFICIENTS*

<i>(Intercept)</i>	Relação a/c	Absorção	Total < 75 µm
-14,0780	9,9905	-1,0447	0,1208

FONTE: O autor (2016).

Não se identificou nenhuma variável sem poder de explicativo. Nenhum dos testes identificou alguma discrepância de variáveis sendo válida a regressão linear da TABELA 15 e TABELA 16.

#### 4.4.4. Intervalos de confiança e equação da regressão linear múltipla

Após essas etapas, calcularam-se os intervalos de confiança em 95% (TABELA 22).

TABELA 22 – RESULTADO FINAL E INTERVALOS DE CONFIANÇA

	<i>Estimate</i>	2,50%	97,50%
<i>(Intercept)</i>	-14,07801	-17,39462	-10,76140
Relação a/c	9,99049	8,18504	11,79594
Absorção	-1,04468	-1,21952	-0,86984
Total < 75 µm	0,12079	0,08141	0,16017

FONTE: O autor (2016).

Com os resultados do interval de confiança de 95%, montou-se a Equação 5.

$$\text{Compressão (MPa)} = -14,07801 + \text{Relação a/c} \cdot 9,9904 - \text{Absorção} \cdot 1,04468 + \text{Total} < 75 \mu\text{m} \cdot 0,12079 \quad (5)$$

Para a confirmação da representatividade, calculou-se a resistência à compressão para comparação com os dados obtidos através do ensaio (TABELA 23).

TABELA 23 – RESULTADO CALCULADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

	Relação a/c	Absorção (%)	Total < 75 μm (%)	Compressão (Mpa)	
				Real	Calculado
<b>ICA</b>	2,22	7,54	24,08	3,23	3,13
<b>IMA</b>	2,25	6,15	30,33	5,33	5,64
<b>MMA</b>	2,19	4,83	23,39	5,59	5,58
<b>ICB</b>	2,13	5,79	20,46	3,66	3,62
<b>MCB</b>	2,13	5,77	19,78	3,49	3,56
<b>IMB</b>	2,32	7,78	25,43	3,92	4,04
<b>MMB</b>	2,44	7,63	21,54	4,97	4,93

FONTE: O autor (2016).

## 5. CONCLUSÃO

Avaliar a influência dos agregados reciclados produzidos nos britadores de mandíbula e de impacto nas argamassas de revestimento foi o objetivo desta pesquisa. Conhecer as semelhanças e diferenças entre os mecanismos de britagem pode facilitar a escolha do mesmo para a produção do agregado em questão.

Cada britador, mandíbula ou impacto, apresentou uma característica de cominuição. O britador de mandíbula apresentou uma concentração maior de grãos nas peneiras superiores do que o de impacto, mesmo fixando-se a dimensão máxima característica, o que pode influenciar na utilização desse material para argamassa de emboço. Além do britador, os materiais com origem de concreto geraram curvas granulométricas mais grossas do que as produzidas com agregados mistos, o que determinou a amostra MCB como a mais grossa dentre as estudadas.

Observando também a forma dos grãos, para o arredondamento houve diferença entre as amostras, mas sem um padrão de comportamento que se pudesse afirmar a superioridade de um tipo de britador. A esfericidade encontrada na amostragem A de concreto foi maior no britador de mandíbula e na mista foi maior no de impacto, entretanto no lote B o comportamento não se manteve, impossibilitando definir o britador mais eficiente para essa característica. Em relação ao índice de forma, no lote A não houve diferenciação das amostras devido ao mecanismo de britagem, no lote B o britador de impacto gerou grãos mais arredondados que na mandíbula. Na forma dos grãos, com os resultados obtidos, e devido ao comportamento heterogêneo entre as amostragens, não se pode indicar um britador mais vantajoso em relação ao outro nesse quesito.

A absorção de água das areias recicladas foi determinada por três diferentes métodos: NBR NM 30 (ABNT, 2001) com e sem finos  $< 75 \mu\text{m}$  e por micro-ondas. Apesar de terem sido encontradas faixas de absorção diferentes pelos três métodos, pode-se afirmar que todos indicaram não ter havido influência na absorção de água em função do britador utilizado (impacto ou mandíbula), mas sim pela natureza do RCD.

Assim como a curva granulométrica, o teor de material passante na peneira  $75 \mu\text{m}$  apresentou valores mais elevados nas amostras de britador de impacto e, principalmente, naquelas de origem mista. Com isto, as areias recicladas produzidas pelo britador de mandíbulas resultaram em argamassas com teor total de finos  $< 75 \mu\text{m}$  inferiores a 23%, conforme recomendado por Miranda (2013) para argamassas com areia reciclada. Já para as areias recicladas produzidas pelo britador de impacto, apenas uma argamassa ficou abaixo deste valor. Ou seja, pode ser necessário

misturar areia natural com a areia reciclada produzida por este britador para diminuição do teor de finos  $< 75 \mu\text{m}$ , de forma a diminuir o risco de surgimento de manifestações patológicas como fissuração, descolamento e pulverulência superficial. Isto indica que a areia reciclada produzida pelo britador de mandíbula é mais recomendada para a produção de argamassas que a produzida por britador de impacto.

Quanto à resistência mecânica, as amostras que demonstraram diferenças estatisticamente significativas apontaram maior ou igual resistência para o britador de mandíbula, seja de tração na flexão ou na compressão. Isto porque tais propriedades foram influenciadas pela relação a/c, absorção e teor total de finos  $< 75 \mu\text{m}$ . Ou seja, de forma indireta, o tipo de britador influenciou nas propriedades mecânicas das argamassas.

Sendo assim, é possível concluir que o tipo de britador influenciou nas propriedades das argamassas produzidas com areia reciclada, mas que, ao contrário do que é normalmente aceito no meio técnico, o britador de mandíbula mostrou produzir areia reciclada com melhor qualidade para argamassas que o britador de impacto.

Adicionalmente, foi possível com os resultados obtidos fazer uma análise de regressão linear múltipla de forma a correlacionar a resistência à compressão da argamassa com as seguintes propriedades dos agregados: relação a/c, absorção de água e teor total de finos  $< 75 \mu\text{m}$ . Esta regressão, com resultado de  $R^2$  igual a 0,994, resultou em uma equação de reta que indica a possibilidade de previsão de tal propriedade em função das variáveis explicativas propostas.

## 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação da influência do tipo de britador no desempenho de revestimento de argamassa quanto à aderência e fissuração;
- Novos testes de absorção de água por micro-ondas visando a normatização do procedimento;
- Desenvolvimento de um volume maior de ensaios, em quantidade maior de amostras, visando validar o modelo de reta de regressão múltipla proposto;
- Avaliação da influência do tipo de britador no teor argamassa aderida na superfície de agregados miúdos e estudo de mecanismos eficazes e de baixo custo para remoção da mesma.

## REFERÊNCIAS

- ABRECON. **Operação de usinas de reciclagem de RCD classe A**. São Paulo: ABRECON, 2014. 5 slides.
- ABRECON. **Relatório pesquisa setorial 2013: A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Paulo, 2013. 22 p.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. São Paulo, 2014. 120 p. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>. Acessado em 15 de outubro de 2015.
- ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 236 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ARNOLD, D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_\_. NBR 11578. **Cimento Portland composto - Especificação**. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_\_. NBR 15116. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. NBR 13278. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. NBR 13281. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos Requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 248. **Agregados – determinação da distribuição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_.NBR NM 30. **Agregado miúdo – Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_.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, 2003.

\_\_\_\_\_.NBR NM 52. **Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSUNÇÃO, T. L.; CARVALHO, F. G.; BARATA, S. M. **Avaliação das propriedades das argamassas de revestimentos produzidas com resíduos da construção e demolição como agregado.** 49º Congresso Brasileiro de Concreto IBSN 97885 – 98576 – 17- 6. Bento Gonçalves. 2007.

BRAGA, M.; BRITO, J. de; VEIGA, R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 36, p.960-968, nov. 2012. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.031.

BUTTNER, 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.

BUTTNER, A. M. **Uso de Agregados Reciclados de Concreto em Blocos de Alvenaria Estrutural.** Tese. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. 2007.

CARASEK, H. Avaliação de resultados do ensaio de resistência de aderência de revestimentos de argamassa. **Téchne**, São Paulo, n. 185, jun. 2012.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo, IBRACON, 2007.

CARASEK, H. **Argamassas.** In: ISAIA, G.C.. (Org.). **Materiais de Construção Civil.** 2ed.São Paulo: IBRACON, 2010, v. 2, p. 893-944.

CARNEIRO, A. P. et al. Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção. **Projeto Entulho Bom.** Salvador. EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. São Paulo: USP, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2005.

CASTRO, A.; PANDOLFELLI, V. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem**, v. 3, 2012, 5 ed., Oficina de Textos, São Paulo.

CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K. H. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 1, p. 125-132, 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. **Construction And Building Materials**, Ancona, n. 23, p.289-294, jan. 2008.

CORRÊA, B. C.; CURSINO, D.; SILVA, G. **Viabilidade de implantação de uma usina de reciclagem da construção civil na cidade de São José dos Campos/Sp**. In: XIII INIC, IX EPG E III INIC JR - UNIVAP, 2009, São José dos Campos.

DAPENA, E. et al. Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes. **J. Mater. Civ. Eng.**, [s.l.], v. 23, n. 4, p.414-422, abr. 2011. American Society of Civil Engineers (ASCE).DOI: 10.1061/(ASCE)mt.1943-5533.0000183.

EUROPEAN STANDARD. **Aggregates for mortar** - prEN 13139. 2002.

FIGUEIRA, R. C. L.; TESSLER, M.G.; MAHIQUES, M.M. de; FUKUMOTO, M. M. & GOYA, S. C. 2004. **Sedimentação recente e níveis de metais pesados em testemunhos do estuário santista**, São Paulo, Brasil. Anais do IV Congresso de Pesquisas Ambientais e Saúde, Santos, SP: 73 – 76.

GALERY, R. **Fragmentação de minérios: primeira parte**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

GRIGOLI, A S.; HELENE, P. **A Construção Habitacional como Foco para a Reciclagem de Entulho de Obra.** In: III Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá, 2002, Maringá. Universidade Estadual de Maringá – Departamento de Engenharia Civil, 2002. v.1. p.78 – 90.

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.

HANSEN, T. C. The second RILEM state of the art report on recycled aggregates and recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**, v. 1, n. 111, p. 201-204, 1986.

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.** Dissertação (Mestrado). Universidade do vale do rio dos sinos, São Leopoldo, 2012.

ISO. 13322-1 **Particle size analysis - Image analysis methods - Part 1: Static image analysis methods.** STANDARDIZATION, I. O. F.: 39 p. 2004.

ITAMBÉ (Paraná). **Relatório de ensaios de cimento: TIPO / CLASSE : CP II-F-32.** Curitiba: 2015. 1 p. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=368&chave=2015-11>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

JOCHEM, L. F.. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de rcd: características físicas e propriedades da microestrutura.** 2012. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

JUAN, M. S. de; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 2, p.872-877, fev. 2009. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012. Disponível em: <<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0950061808001086?httpAccept=text/xml>>. Acesso em: 15 set. 2015.

KANEKO, R. F. **Desenvolvimento de método para determinação da absorção de água em agregados miúdos reciclados através de micro-ondas.** 142 p. Trabalho final de curso. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição.** 2001. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

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.

LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das construções: procedimento para formulação do diagnóstico de falhas e definição de conduta adequada à recuperação de edificações.** São Paulo, 1985. 191p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade São Paulo.

LUCENA, L. F. L.; NEVES, G. A.; NASCIMENTO, J. D.; OLIVEIRA, D. F., 2005, **Diagnóstico da geração de resíduos da construção civil no Município de Campina Grande.** In: Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, 4., Encontro Latino-Americano de Gestão e Economia da Construção, 1., Porto Alegre.

LUZ, A. B. da; POSSA, M. V.; ALMEIDA, S. L. **Tratamento de minérios.** 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM – Centro de tecnologia mineral e CNPq., 1998, 676 p.

MACHINERY, SbmShibang. **EW Jaw Crusher.** Disponível em: <[http://www.sbmchina.com/product/pew\\_jaw\\_crusher.html](http://www.sbmchina.com/product/pew_jaw_crusher.html)>. Acesso em: 19 de maio de 2015.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3º ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MIRANDA, L. F. R. et al. Use of Recycled Sand Produced at Construction Sites in Bedding Mortars. *J. Mater. Civ. Eng.*, [s.l.], v. 25, n. 2, p.236-242, fev. 2013. **American Society of Civil Engineering (ASCE)**. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000593.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. Argamassas com areia de entulho reciclado. **Téchne**, São Paulo, n. 74, maio 2003.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75µm on mortar properties. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 20, n. 9, p.615-624, nov. 2006. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.02.025. Disponível em: <<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0950061805001212?httpAccept=text/xml>>.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part II – Analysis of the effect of materials finer than 75µm under accelerated aging performance. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 20, n. 9, p.625-633, nov. 2006. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.02.026. Disponível em: <<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0950061805001224?httpAccept=text/xml>>.

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

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatos que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 172p.

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

PAIXÃO, S. de O. **Estudo do uso de resíduo cerâmico de obras como agregado miúdo para a fabricação de argamassas para revestimento de alvenarias**. 2013. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PORTO, L. E.; MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C. **Avaliação de um processo racional de dosagem de argamassa de assentamento com areia reciclada produzida em obra**. In: XIV Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, 2012, Juiz de Fora.

PROGUARU. **Abastecimento da moega**. 2015. Disponível em: <<http://www.proguaru.com.br/site/node/469>>. Acesso em: 05 ago. 2015.

ROMANO, R. C. O. Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil. 2013. 200 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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.

SAGOE-CRENTSIL, K. K; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n.5, p. 707-712, 2001.

SAIKIA, N.; BRITO, J. **Recycled Aggregate in Concrete – Use of Industrial, Construction and Demolition Waste**. Springer-Verlag. London, 2013.

SANTANA, M. J. A.; CARNEIRO, A. P.; SAMPAIO, T. S. **Uso do agregado reciclado em argamassas de revestimento**. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Salvador. EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. p. 262 – 299.

SILVA, C. A. R. S. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas**. Dissertação (Mestrado). 194p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas. Ouro Preto, 2009.

SOLUTIONS, Thyssen Krupp Industrial. **Britador de impacto em modelo 3D**. Disponível em: <<http://www.tkis.com.br/en/produtos/processo/processo/>>. Acesso em: 23 ago. 2015.

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.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. 222 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

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

# APÊNDICE

**APÊNDICE A – RESULTADOS FORMA DOS GRÃOS**

		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 – RESULTADOS DE ARREDONDAMENTO, ESFERICIDADE E ÍNDICE DE FORMA

### 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 – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA A

	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>		<i>ICA</i>	<i>MCA</i>
Média	0,5774166	0,5398522	Média	0,5121864	0,5084021
Variância	0,0117547	0,0149936	Variância	0,0139977	0,0160365
Observações	165	165	Observações	165	165
Correlação de Pearson	0,0376023		Correlação de Pearson	0,0402131	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	164		gl	164	
Stat t	3,0069763		Stat t	0,286292	
P(T<=t) uni-caudal	0,0015271		P(T<=t) uni-caudal	0,3875079	
t crítico uni-caudal	1,6541979		t crítico uni-caudal	1,6541979	
P(T<=t) bi-caudal	0,0030542		P(T<=t) bi-caudal	0,7750158	
t crítico bi-caudal	1,9745345		t crítico bi-caudal	1,9745345	

### APÊNDICE B.4. – 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.5. – 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. – ARREDONDAMENTO – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA B

	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>		<i>ICB</i>	<i>MCB</i>
Média	0,480225	0,50513	Média	0,51556	0,463495
Variância	0,0110285	0,0123426	Variância	0,011549283	0,0125173
Observações	200	200	Observações	200	200
Correlação de Pearson	0,0599578		Correlação de Pearson	0,132853962	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	199		gl	199	
Stat t	2,3761059		Stat t	5,096595761	
P(T<=t) uni-caudal	0,0092228		P(T<=t) uni-caudal	4,00837E-07	
t crítico uni-caudal	1,6525467		t crítico uni-caudal	1,652546747	
P(T<=t) bi-caudal	0,0184455		P(T<=t) bi-caudal	8,01674E-07	
t crítico bi-caudal	1,9719565		t crítico bi-caudal	1,971956498	

## APÊNDICE B.7. – ESFERICIDADE – MÉDIA E VARIÂNCIA - AMOSTRA A

<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.8. – 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.9. – ESFERICIDADE – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA A

	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>		<i>ICA</i>	<i>MCA</i>
Média	0,4682726	0,4094534	Média	0,4034465	0,439717
Variância	0,0189345	0,0174941	Variância	0,0189423	0,0222818
Observações	165	165	Observações	165	165
Correlação de Pearson	0,0760875		Correlação de Pearson	0,0154125	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	164		gl	164	
Stat t	4,1182306		Stat t	2,3124996	
P(T<=t) uni-caudal	3,02E-05		P(T<=t) uni-caudal	0,0109965	
t crítico uni-caudal	1,6541979		t crítico uni-caudal	1,6541979	
P(T<=t) bi-caudal	6,039E-05		P(T<=t) bi-caudal	0,021993	
t crítico bi-caudal	1,9745345		t crítico bi-caudal	1,9745345	

## APÊNDICE B.10. – 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.11. – 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.12. – ESFERICIDADE – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA B

	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>		<i>IMB</i>	<i>MMB</i>
Média	0,303035	0,254565	Média	0,2044	0,374895
Variância	0,0149738	0,0111887	Variância	0,0097225	0,0222857
Observações	200	200	Observações	200	200
Correlação de Pearson	0,0055118		Correlação de Pearson	0,0991686	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	199		gl	199	
Stat t	4,2494867		Stat t	-14,13723	
P(T<=t) uni-caudal	1,645E-05		P(T<=t) uni-caudal	3,572E-32	
t crítico uni-caudal	1,6525467		t crítico uni-caudal	1,6525467	
P(T<=t) bi-caudal	3,291E-05		P(T<=t) bi-caudal	7,145E-32	
t crítico bi-caudal	1,9719565		t crítico bi-caudal	1,9719565	

## APÊNDICE B.13. – 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.14. – 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.15. – ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO MIÚDO – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA A

	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>		<i>ICA</i>	<i>MCA</i>
Média	1,499026	1,550167	Média	1,655844	1,666304
Variância	0,081824	0,135095	Variância	0,170663	0,1768
Observações	165	165	Observações	165	165
Correlação de Pearson	0,02897		Correlação de Pearson	0,089171	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	164		gl	164	
Stat t	-1,4307		Stat t	-0,23884	
P(T<=t) uni-caudal	0,07721		P(T<=t) uni-caudal	0,405764	
t crítico uni-caudal	1,654198		t crítico uni-caudal	1,654198	
P(T<=t) bi-caudal	0,15442		P(T<=t) bi-caudal	0,811528	
t crítico bi-caudal	1,974535		t crítico bi-caudal	1,974535	

APÊNDICE B.16. – 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.17. – 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.18. – ÍNDICE DE FORMA DO AGREGADO MIÚDO – MODELO ESTATÍSTICO TEST T -  
AMOSTRA B

	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>		<i>ICB</i>	<i>MCB</i>
Média	1,526155	1,60274	Média	1,559755	1,66398
Variância	0,088295	0,136686	Variância	0,161644	0,21668
Observações	200	200	Observações	200	200
Correlação de Pearson	-0,01783		Correlação de Pearson	0,047617	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	199		gl	199	
Stat t	-2,2638		Stat t	-2,4549	
P(T<=t) uni-caudal	0,012333		P(T<=t) uni-caudal	0,007476	
t crítico uni-caudal	1,652547		t crítico uni-caudal	1,652547	
P(T<=t) bi-caudal	0,024665		P(T<=t) bi-caudal	0,014951	
t crítico bi-caudal	1,971956		t crítico bi-caudal	1,971956	

## APÊNDICE C – RESULTADOS DE MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA

### 75 $\mu\text{m}$

#### APÊNDICE C.1. – TABELA DE RESULTADOS INDIVIDUAIS DE MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA

75  $\mu\text{m}$

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 C.2. – MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75 $\mu\text{m}$ – 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 C.3. – MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75 $\mu\text{m}$ – MODELO ESTATÍSTICO ANOVA - AMOSTRA A

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
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 C.4. – MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75 $\mu\text{m}$ – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA A

	<i>IMA</i>	<i>MMA</i>		<i>ICA</i>	<i>MCA</i>
Média	0,206675	0,12725	Média	0,13525	0,1122
Variância	4,64E-05	9,19E-05	Variância	3,38E-05	3,34E-05
Observações	4	4	Observações	4	4
Correlação de Pearson	-0,72889		Correlação de Pearson	-0,19007	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
<i>gl</i>	3		<i>gl</i>	3	
Stat t	10,3917		Stat t	5,156178	
P(T<=t) uni-caudal	0,000951		P(T<=t) uni-caudal	0,007072	
t crítico uni-caudal	2,353363		t crítico uni-caudal	2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,001902		P(T<=t) bi-caudal	0,014145	
t crítico bi-caudal	3,182446		t crítico bi-caudal	3,182446	

APÊNDICE C.5. – MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$  – MÉDIA E VARIÂNCIA - AMOSTRA B

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
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 C.6. – MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$  – MODELO ESTATÍSTICO ANOVA - AMOSTRA B

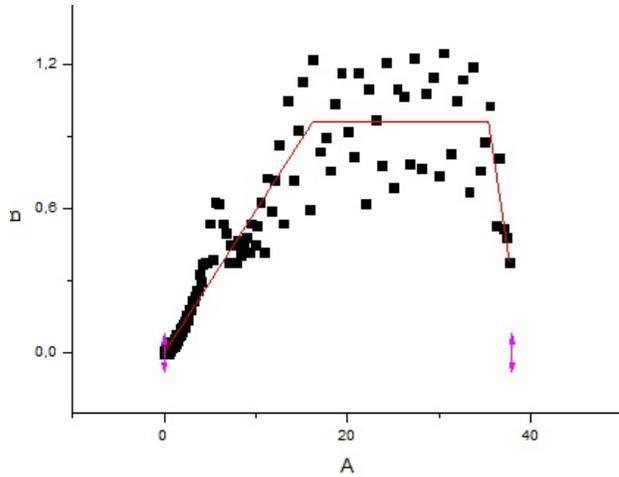
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,009987	3	0,003329	68,37782	8,16E-08	3,490295
Dentro dos grupos	0,000584	12	4,87E-05			
Total	0,010571	15				

APÊNDICE C.7. – MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$  – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA B

	<i>IMB</i>	<i>MMB</i>		<i>ICB</i>	<i>MCB</i>
Média	0,1506	0,1062	Média	0,093775	0,08605
Variância	5,68E-05	4,24E-05	Variância	1,69E-05	7,87E-05
Observações	4	4	Observações	4	4
Correlação de Pearson	0,127656		Correlação de Pearson	-0,28247	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	3		gl	3	
Stat t	9,541954		Stat t	1,433082	
P(T<=t) uni-caudal	0,001221		P(T<=t) uni-caudal	0,123638	
t crítico uni-caudal	2,353363		t crítico uni-caudal	2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,002441		P(T<=t) bi-caudal	0,247275	
t crítico bi-caudal	3,182446		t crítico bi-caudal	3,182446	

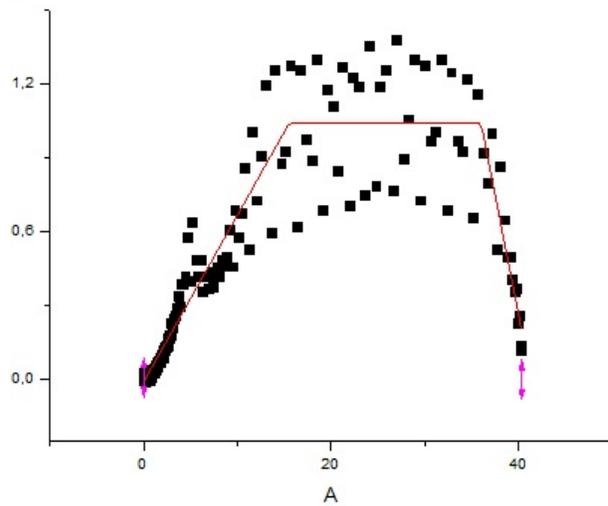
## APÊNDICE D – RESULTADOS DE ABSORÇÃO NO MICRO-ONDAS

### APÊNDICE D.1. – ABSORÇÃO AMOSTRA ICA1 – MICRO-ONDAS



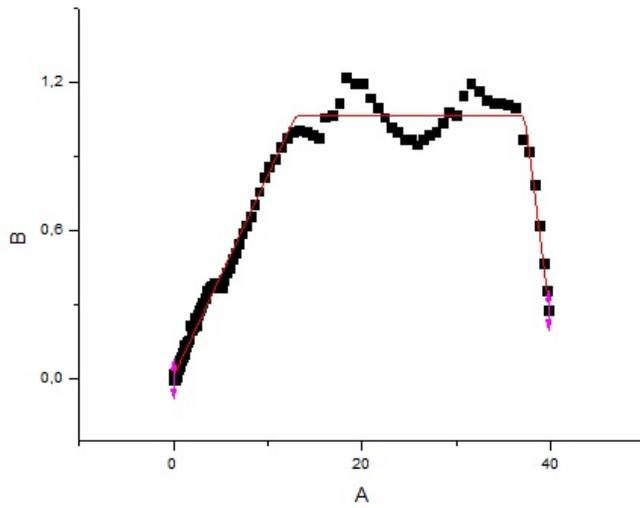
Equation		$\text{if}(x < x2)$ $y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);$ $\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3)$ $y = y2;$ $\text{else}$ $y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);$	
Adj. R-Square	0,93391		
		Value	Standard Error
B	x1	-0,00146	4,32884E6
B	y1	-5,69009E-5	257014,93147
B	x2	16,2367	0,51836
B	y2	0,96405	0,0166
B	x3	35,36514	0,0525
B	x4	38,4481	--
B	y4	0,17753	--

### APÊNDICE D.2. – ABSORÇÃO AMOSTRA ICA2 – MICRO-ONDAS



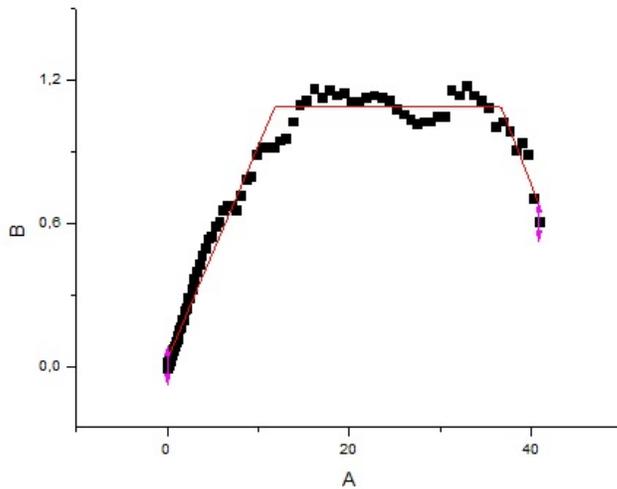
Equation		$\text{if}(x < x2)$ $y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);$ $\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3)$ $y = y2;$ $\text{else}$ $y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);$	
Adj. R-Square	0,9234		
		Value	Standard Error
B	x1	0,0521	1,04118E7
B	y1	-0,00534	704953,24736
B	x2	15,51211	0,53821
B	y2	1,04139	0,01828
B	x3	36,00044	0,04732
B	x4	40,94838	--
B	y4	0,07673	--

### APÊNDICE D.3. – ABSORÇÃO AMOSTRA MCA1 – MICRO-ONDAS



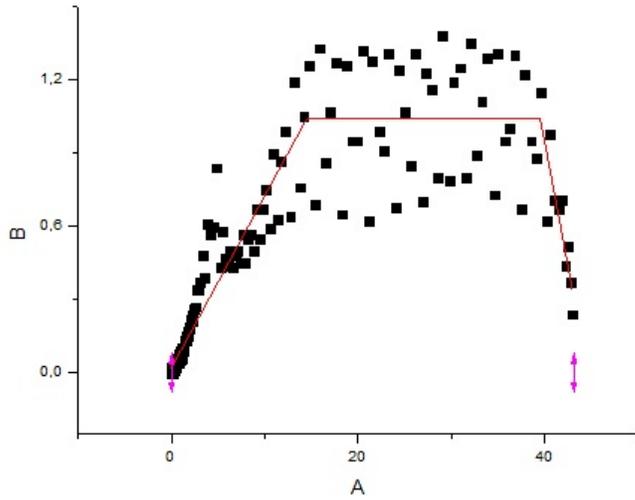
Equation	$\text{if}(x < x2 )$ $y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);$ $\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3 )$ $y = y2;$ $\text{else}$ $y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);$		
Adj. R-Square	0,98988		
		Value	Standard Error
B	x1	-0,06628	4,16389E6
B	y1	0,00542	338933,48889
B	x2	13,0015	0,21214
B	y2	1,06909	0,00764
B	x3	37,22615	0,01054
B	x4	40,22204	--
B	y4	0,16378	--

### APÊNDICE D.4. – ABSORÇÃO AMOSTRA MCA2 – MICRO-ONDAS



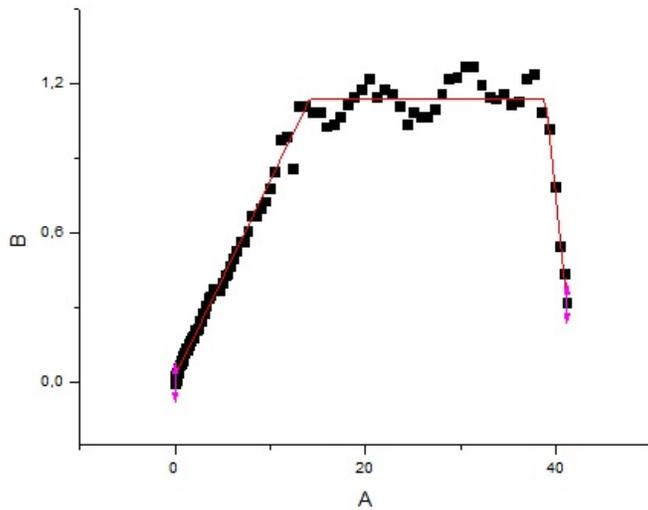
Equation	$\text{if}(x < x2 )$ $y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);$ $\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3 )$ $y = y2;$ $\text{else}$ $y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);$		
Adj. R-Square	0,98609		
		Value	Standard Error
B	x1	-0,18052	7,21511E6
B	y1	0,01552	645962,05557
B	x2	11,84343	0,25372
B	y2	1,09194	0,00965
B	x3	36,62632	0,41684
B	x4	44,14792	--
B	y4	0,35908	--

APÊNDICE D.5. – ABSORÇÃO AMOSTRA IMA1 – MICRO-ONDAS



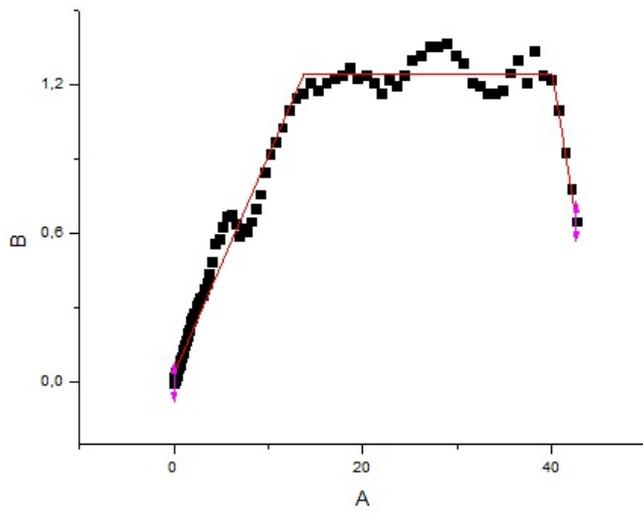
Equation	$\text{if}(x < x2)$ $y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);$ $\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3)$ $y = y2;$ $\text{else}$ $y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);$		
Adj. R-Square	0,90342		
		Value	Standard E ro
B	x1	-0,12638	--
B	y1	0,01116	--
B	x2	14,49694	0,64761
B	y2	1,04261	0,02072
B	x3	39,53024	0,55501
B	x4	44,03362	--
B	y4	0,11789	--

APÊNDICE D.6. – ABSORÇÃO AMOSTRA IMA2 – MICRO-ONDAS



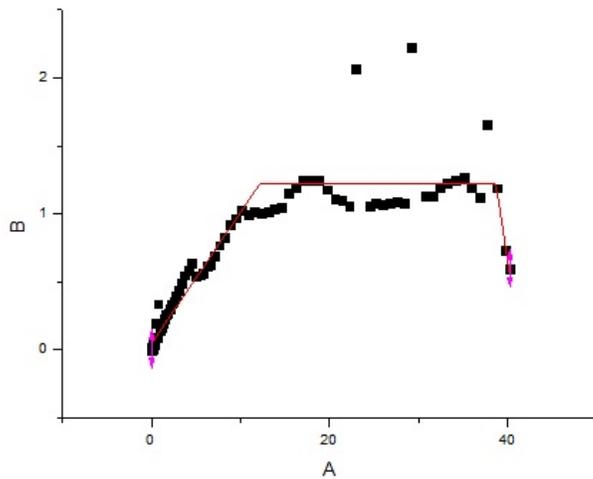
Equation	$\text{if}(x < x2)$ $y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);$ $\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3)$ $y = y2;$ $\text{else}$ $y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);$		
Adj. R-Squar	0,99153		
		Value	Standard E ro
B	x1	-0,15721	--
B	y1	0,01439	--
B	x2	14,1906	0,09615
B	y2	1,1425	0,00751
B	x3	38,9030	0,1101
B	x4	41,5286	8,06336E 6
B	y4	0,16575	2,77982E 6

APÊNDICE D.7. – ABSORÇÃO AMOSTRA MMA1 – MICRO-ONDAS



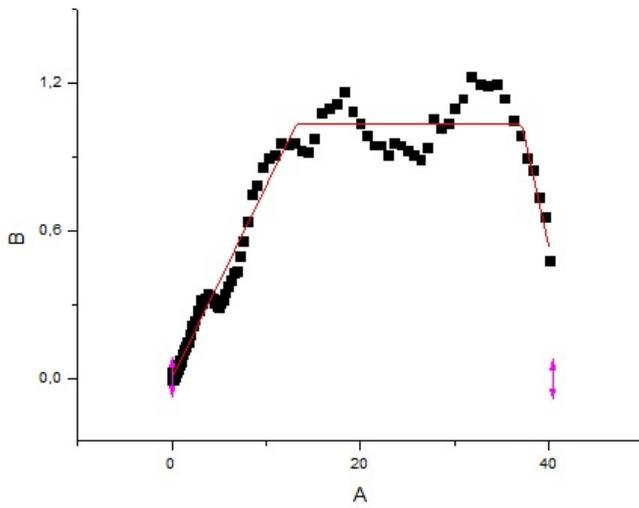
Equation	$\text{if}(x < x2)$ $y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);$ $\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3)$ $y = y2;$ $\text{else}$ $y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);$		
Adj. R-Squar	0,98872		
		Value	Standard Erro
B	x1	-0,18592	--
B	y1	0,01713	--
B	x2	13,7824	0,25228
B	y2	1,2471	0,00987
B	x3	40,0729	0,01774
B	x4	44,2503	--
B	y4	0,26092	--

APÊNDICE D.8. – ABSORÇÃO AMOSTRA MMA2 – MICRO-ONDAS



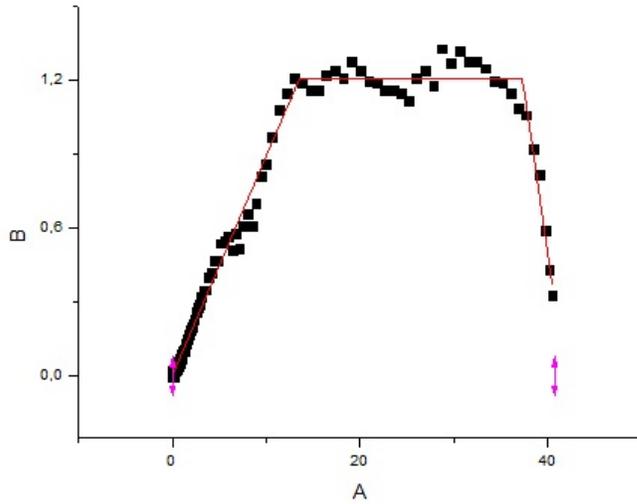
Equation	$\text{if}(x < x2)$ $y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);$ $\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3)$ $y = y2;$ $\text{else}$ $y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);$		
Adj. R-Square	0,89853		
		Value	Standard Error
B	x1	-0,18661	--
B	y1	0,02837	--
B	x2	12,14802	0,79387
B	y2	1,21944	0,03105
B	x3	38,69571	0,0433
B	x4	41,30213	--
B	y4	0,08734	--

APÊNDICE D.9. – ABSORÇÃO AMOSTRA ICB1 – MICRO-ONDAS



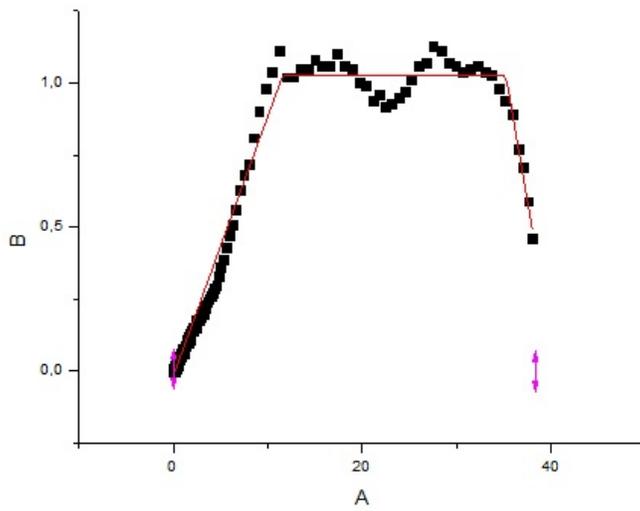
Equation	$\text{if}(x < x2)$ $y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);$ $\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3)$ $y = y2;$ $\text{else}$ $y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);$		
Adj. R-Square	0,97979		
		Value	Standard Error
B	x1	-0,02161	--
B	y1	0,00198	--
B	x2	13,24228	0,31062
B	y2	1,03774	0,01089
B	x3	37,09725	0,366
B	x4	41,85231	3,25478E7
B	y4	0,21765	5,37683E6

APÊNDICE D.10. – ABSORÇÃO AMOSTRA ICB2 – MICRO-ONDAS



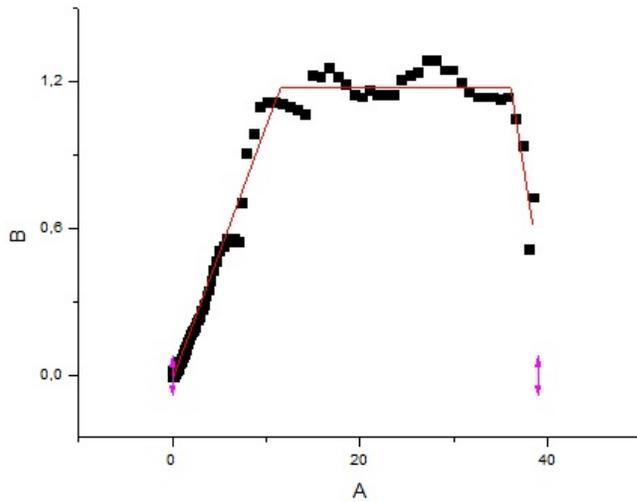
Equation	$\text{if}(x < x2)$ $y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1);$ $\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3)$ $y = y2;$ $\text{else}$ $y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);$		
Adj. R-Square	0,99285		
		Value	Standard Error
B	x1	-0,01859	--
B	y1	0,0018	--
B	x2	13,54868	0,19628
B	y2	1,21	0,00788
B	x3	37,31524	0,13725
B	x4	41,44285	--
B	y4	0,11042	--

## APÊNDICE D.11. – ABSORÇÃO AMOSTRA MCB1 – MICRO-ONDAS



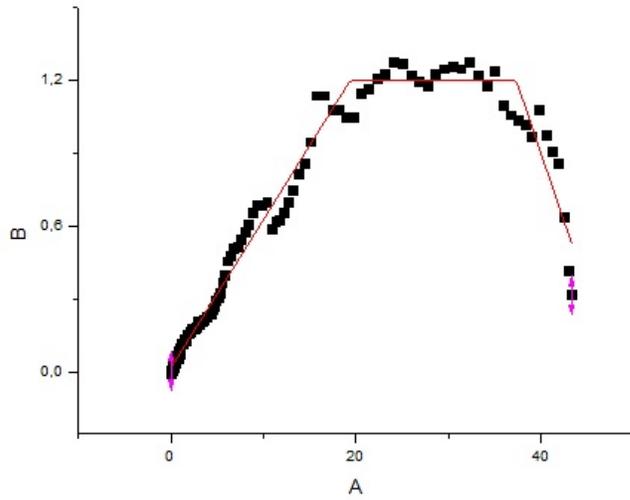
Equation		if( x < x2 ) y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1); else if (x > x2 && x < x3 ) y = y2; else y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);	
Adj. R-Squa	0,99048	Value	Standard Err
B	x1	0,08918	--
B	y1	-0,0079	--
B	x2	11,5894	0,18147
B	y2	1,02687	0,00702
B	x3	35,2005	0,22948
B	x4	39,4565	--
B	y4	0,21164	--

## APÊNDICE D.12. – ABSORÇÃO AMOSTRA MCB2 – 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-Square	0,99057	Value	Standard Error
B	x1	0,07635	3,14087E6
B	y1	-0,00808	325407,25586
B	x2	11,54088	0,20362
B	y2	1,17966	0,00869
B	x3	36,05562	0,22757
B	x4	40,23072	--
B	y4	0,17315	--

APÊNDICE D.13. – ABSORÇÃO AMOSTRA IMB1 – MICRO-ONDAS

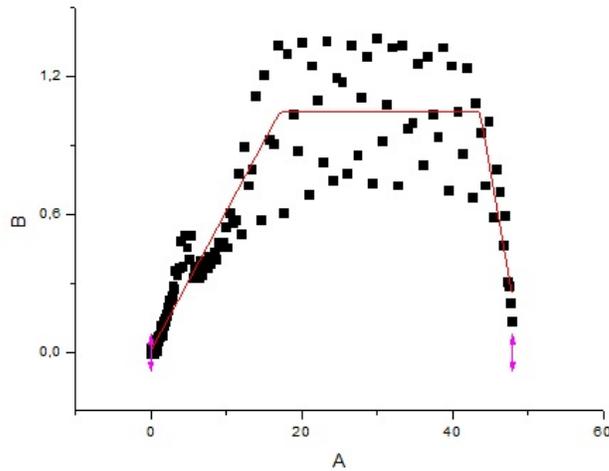


Equation

$$\begin{aligned}
 &\text{if}(x < x2) \\
 &\quad y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1); \\
 &\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3) \\
 &\quad y = y2; \\
 &\text{else} \\
 &\quad y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);
 \end{aligned}$$

Adj. R-Square	0,98234		
		Value	Standard Error
B	x1	-0,13733	2,8275E6
B	y1	0,01102	172428,31777
B	x2	19,38502	0,38387
B	y2	1,2015	0,01331
B	x3	37,31863	0,37694
B	x4	45,93533	--
B	y4	0,23439	--

APÊNDICE D.14. – ABSORÇÃO AMOSTRA IMB2 – MICRO-ONDAS

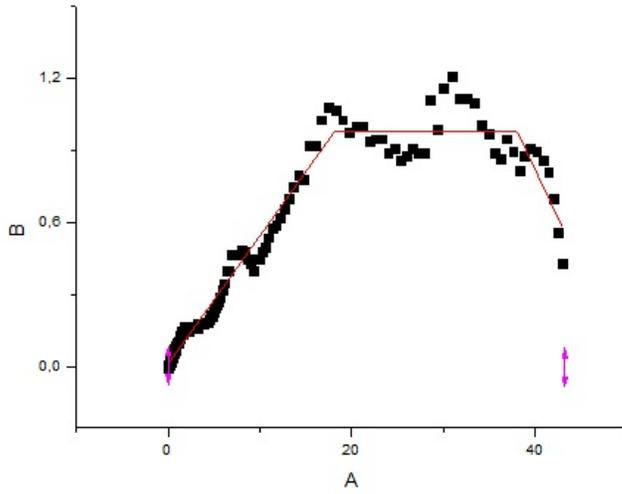


Equation

$$\begin{aligned}
 &\text{if}(x < x2) \\
 &\quad y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1); \\
 &\text{else if}(x > x2 \ \&\& \ x < x3) \\
 &\quad y = y2; \\
 &\text{else} \\
 &\quad y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);
 \end{aligned}$$

Adj. R-Square	0,92118		
		Value	Standard Error
B	x1	-0,06522	--
B	y1	0,0051	--
B	x2	17,13455	0,6293
B	y2	1,04892	0,01849
B	x3	43,65638	0,46906
B	x4	48,81098	1,41329E7
B	y4	0,08254	2,52984E6

APÊNDICE D.15. – ABSORÇÃO AMOSTRA MMB1 – MICRO-ONDAS

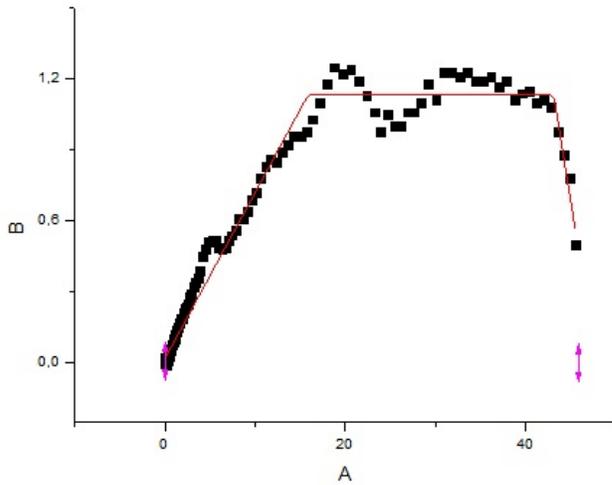


Equation

$$\begin{aligned}
 &\text{if}( x < x2 ) \\
 &\quad y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1); \\
 &\text{else if}( x > x2 \ \&\& \ x < x3 ) \\
 &\quad y = y2; \\
 &\text{else} \\
 &\quad y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);
 \end{aligned}$$

Adj. R-Square	0,97563		
		Value	Standard Error
B	x1	-0,09782	–
B	y1	0,00896	–
B	x2	18,20701	0,39753
B	y2	0,98393	0,01147
B	x3	37,98664	0,50304
B	x4	46,5522	–
B	y4	0,29026	–

APÊNDICE D.16. – ABSORÇÃO AMOSTRA MMB2 – MICRO-ONDAS



Equation

$$\begin{aligned}
 &\text{if}( x < x2 ) \\
 &\quad y = (y1*(x2-x)+y2*(x-x1))/(x2-x1); \\
 &\text{else if}( x > x2 \ \&\& \ x < x3 ) \\
 &\quad y = y2; \\
 &\text{else} \\
 &\quad y = (y2*(x4-x)+y4*(x-x3))/(x4-x3);
 \end{aligned}$$

Adj. R-Square	0,98719		
		Value	Standard Error
B	x1	-0,12317	–
B	y1	0,00997	–
B	x2	15,90942	0,27606
B	y2	1,13576	0,00901
B	x3	43,0812	0,23808
B	x4	46,75083	1,38934E7
B	y4	0,26369	3,10395E6

## APÊNDICE E – RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

APÊNDICE E.1. – TABELA DE RESULTADOS INDIVIDUAIS MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA COM MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$

		Ms	M1	M2	m	Va	d1 (g/cm <sup>3</sup> )	d2 (g/cm <sup>3</sup> )	d3 (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)
ICA	1	500,03	877,94	1159,1	453,05	281,15	2,07	2,28	2,64	10,37%
	2	500	841,81	1123,7	460,55	281,92	2,11	2,29	2,58	8,57%
IMA	1	500,06	875,72	1156	467,44	280,24	2,13	2,28	2,50	6,98%
	2	500,03	840,68	1120,9	463,15	280,23	2,11	2,28	2,53	7,96%
MCA	1	500	877,01	1155,2	463,22	278,17	2,09	2,25	2,50	7,94%
	2	500	843,46	1123,9	460,76	280,48	2,10	2,28	2,56	8,52%
MMA	1	500	840,32	1116,3	475,76	275,99	2,12	2,23	2,38	5,10%
	2	500	839,16	1114,5	474,02	275,38	2,11	2,23	2,39	5,48%
ICB	1	500,06	870,38	1154,3	469,63	283,93	2,17	2,31	2,53	6,48%
	2	500	882,28	1166,6	466,63	284,28	2,16	2,32	2,56	7,15%
IMB	1	500,22	870,44	1144,8	461,45	274,35	2,04	2,22	2,47	8,40%
	2	500,22	882,53	1161,4	461,2	278,88	2,09	2,26	2,53	8,46%
MCB	1	500,16	870,47	1151,8	472,88	281,37	2,16	2,29	2,47	5,77%
	2	500	882,23	1168,3	469,92	286,08	2,20	2,34	2,56	6,40%
MMB	1	500	870,76	1145,3	461,42	274,58	2,05	2,22	2,47	8,36%
	2	500	843,75	1116,3	465,2	272,58	2,05	2,20	2,42	7,48%

APÊNDICE E.2. – TABELA DE MÉDIAS DOS RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

		d1 Média (g/cm <sup>3</sup> )	d2 Média (g/cm <sup>3</sup> )	d3 Média (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção Média (%)
ICA	$\frac{1}{2}$	2,09	2,29	2,61	9,5%
IMA	$\frac{1}{2}$	2,12	2,28	2,52	7,5%
MCA	$\frac{1}{2}$	2,09	2,27	2,53	8,2%
MMA	$\frac{1}{2}$	2,12	2,23	2,38	5,3%
ICB	$\frac{1}{2}$	2,17	2,32	2,54	6,8%
IMB	$\frac{1}{2}$	2,07	2,24	2,50	8,4%
MCB	$\frac{1}{2}$	2,18	2,31	2,51	6,1%
MMB	$\frac{1}{2}$	2,05	2,21	2,44	7,9%

APÊNDICE E.3. – TABELA DE RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA SEM MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$

		Ms	m	Absorção (%)	Absorção (%)
<b>ICA</b>	<u>1</u>	432,51	399,57	8,24%	7,5%
	<u>2</u>	445,25	414,77	7,35%	
	<u>3</u>	458,01	427,42	7,16%	
	<u>4</u>	476,49	443,55	7,43%	
<b>IMA</b>	<u>1</u>	414,02	390,04	6,15%	6,1%
	<u>2</u>	408,37	387,86	5,29%	
	<u>3</u>	442,61	414,71	6,73%	
	<u>4</u>	436,56	410,22	6,42%	
<b>MCA</b>	<u>1</u>	436,40	408,54	6,82%	6,9%
	<u>2</u>	439,07	411,08	6,81%	
	<u>3</u>	467,05	435,95	7,13%	
	<u>4</u>	468,63	438,47	6,88%	
<b>MMA</b>	<u>1</u>	460,38	442,68	4,00%	4,8%
	<u>2</u>	466,45	442,99	5,30%	
	<u>3</u>	458,64	438,82	4,52%	
	<u>4</u>	465,47	441,21	5,50%	
<b>ICB</b>	<u>1</u>	470,3	445,07	5,67%	5,8%
	<u>2</u>	474,19	447,94	5,86%	
	<u>3</u>	467,74	441,47	5,95%	
	<u>4</u>	469,1	443,77	5,71%	
<b>IMB</b>	<u>1</u>	450	417,26	7,85%	7,8%
	<u>2</u>	447,32	414,98	7,79%	
	<u>3</u>	448,89	418,32	7,31%	
	<u>4</u>	444,12	410,5	8,19%	
<b>MCB</b>	<u>1</u>	487,17	460,11	5,88%	5,8%
	<u>2</u>	483,06	455,50	6,05%	
	<u>3</u>	485,8	458,01	6,07%	
	<u>4</u>	476,47	453,35	5,10%	
<b>MMB</b>	<u>1</u>	474,99	437,53	8,56%	7,6%
	<u>2</u>	461,22	430,90	7,04%	
	<u>3</u>	463,53	431,9	7,32%	
	<u>4</u>	431,93	401,34	7,62%	

APÊNDICE E.4. – ABSORÇÃO DE ÁGUA SEM MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$  – MÉDIA E VARIÂNCIA - AMOSTRA A

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
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 E.5. – ABSORÇÃO DE ÁGUA SEM MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$  – 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	0,00164	3	0,000547	19,49159	6,6E-05	3,490295
Dentro dos grupos	0,000336	12	2,8E-05			
Total	0,001976	15				

APÊNDICE E.6. – ABSORÇÃO DE ÁGUA SEM MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$  – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA A

	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>		<i>IMA</i>	<i>MMA</i>
Média	0,07544	0,069102	Média	0,061462	0,048273
Variância	2,31E-05	2,32E-06	Variância	3,83E-05	4,85E-05
Observações	4	4	Observações	4	4
Correlação de Pearson	-0,57729		Correlação de Pearson	-0,30925	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	3		gl	3	
Stat t	2,179987		Stat t	2,476372	
P(T<=t) uni-caudal	0,058675		P(T<=t) uni-caudal	0,044779	
t crítico uni-caudal	2,353363		t crítico uni-caudal	2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,11735		P(T<=t) bi-caudal	0,089557	
t crítico bi-caudal	3,182446		t crítico bi-caudal	3,182446	

APÊNDICE E.7. – ABSORÇÃO DE ÁGUA SEM MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$  – MÉDIA E VARIÂNCIA - AMOSTRA B

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
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 E.8. – ABSORÇÃO DE ÁGUA SEM MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$  – 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	0,001486	3	0,000495	24,8603	1,95E-05	3,490295
Dentro dos grupos	0,000239	12	1,99E-05			
Total	0,001725	15				

APÊNDICE E.9. – ABSORÇÃO DE ÁGUA SEM MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA 75  $\mu\text{m}$  – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA A

	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>		<i>IMB</i>	<i>MMB</i>
Média	0,057969	0,057748	Média	0,077843	0,076359
Variância	1,73E-06	2,1E-05	Variância	1,32E-05	4,38E-05
Observações	4	4	Observações	4	4
Correlação de Pearson	0,602374		Correlação de Pearson	0,271049	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	3		gl	3	
Stat t	0,112469		Stat t	0,44779	
P(T<=t) uni-caudal	0,458778		P(T<=t) uni-caudal	0,342333	
t crítico uni-caudal	2,353363		t crítico uni-caudal	2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,917555		P(T<=t) bi-caudal	0,684665	
t crítico bi-caudal	3,182446		t crítico bi-caudal	3,182446	

**Legenda**

- Ms** Massa da amostra na condição saturado e superfície seca  
**M1** Massa do conjunto (frasco + agregado)  
**M2** Massa total (frasco + agregado + água)  
**m** Massa da amostra seca em estufa  
**Va** Volume de água adicionada no frasco  
**d1** Massa específica aparente do agregado seco  
**d2** Massa específica do agregado saturado superfície seca  
**d3** Massa específica do agregado

## APÊNDICE F – RESULTADOS DE MASSA UNITÁRIA

APÊNDICE F.1. – TABELA DOS RESULTADOS INDIVIDUAIS DE MASSA UNITÁRIA

	1ª (g)	2ª (g)	3ª (g)	4ª (g)	Média (g)	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )
<b>ICA</b>	491,25	496,15	499,99	504,95	498,09	1247,49
<b>MCA</b>	509,91	507,01	510,91	509,60	509,36	1275,72
<b>IMA</b>	481,51	483,40	478,50	478,68	480,52	1203,50
<b>MMA</b>	499,81	500,09	496,74	496,01	498,16	1247,68
<b>ICB</b>	523,31	520,62	519,32	521,80	521,26	1305,54
<b>MCB</b>	528,85	535,04	526,63	531,32	530,46	1328,57
<b>IMB</b>	475,72	484,35	478,58	485,10	480,94	1204,54
<b>MMB</b>	482,48	485,96	479,63	479,19	481,82	1206,74

## APÊNDICE G – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO

### APÊNDICE G.1. – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

	Tração na flexão (MPa)			Média (MPa)
<b>ICA</b>	1,33	1,40	1,39	1,37
<b>MCA</b>	2,11	2,40	2,19	2,23
<b>IMA</b>	1,89	2,05	1,88	1,94
<b>MMA</b>	1,67	1,99	1,85	1,84
<b>ICB</b>	1,57	1,55	1,71	1,61
<b>MCB</b>	1,60	1,51	1,53	1,55
<b>IMB</b>	1,48	1,55	1,48	1,50
<b>MMB</b>	1,63	1,76	1,75	1,71

### APÊNDICE G.2. – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO – MÉDIA E VARIÂNCIA - AMOSTRA A

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
ICA	3	4,12	1,373333	0,001433
MCA	3	6,7	2,233333	0,022433
IMA	3	5,82	1,94	0,0091
MMA	3	5,51	1,836667	0,025733

### APÊNDICE G.3. – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO 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	1,147092	3	0,382364	26,05546	0,000176	4,066181
Dentro dos grupos	0,1174	8	0,014675			
Total	1,264492	11				

### APÊNDICE G.4. – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA A

	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>		<i>IMA</i>	<i>MMA</i>
Média	1,373333	2,233333	Média	1,94	1,836667
Variância	0,001433	0,022433	Variância	0,0091	0,025733
Observações	3	3	Observações	3	3
Correlação de Pearson	0,799461		Correlação de Pearson	0,797244	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	2		gl	2	
Stat t	-12,2441		Stat t	1,752224	
P(T<=t) uni-caudal	0,003302		P(T<=t) uni-caudal	0,110916	
t crítico uni-caudal	2,919986		t crítico uni-caudal	2,919986	
P(T<=t) bi-caudal	0,006604		P(T<=t) bi-caudal	0,221832	
t crítico bi-caudal	4,302653		t crítico bi-caudal	4,302653	

## APÊNDICE G.5. – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO – MÉDIA E VARIÂNCIA - AMOSTRA B

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
ICB	3	4,83	1,61	0,0076
MCB	3	4,64	1,546667	0,002233
IMB	3	4,51	1,503333	0,001633
MMB	3	5,14	1,713333	0,005233

## APÊNDICE G.6. – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO 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	0,074867	3	0,024956	5,977379	0,019334	4,066181
Dentro dos grupos	0,0334	8	0,004175			
Total	0,108267	11				

## APÊNDICE G.7. – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO MODELO ESTATÍSTICO TEST T AMOSTRA B

	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>		<i>IMB</i>	<i>MMB</i>
Média	1,61	1,546667	Média	1,503333	1,713333
Variância	0,0076	0,002233	Variância	0,001633	0,005233
Observações	3	3	Observações	3	3
Correlação de Pearson	-0,19418		Correlação de Pearson	0,558661	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	2		gl	2	
Stat t	1,025904		Stat t	-6,06218	
P(T<=t) uni-caudal	0,206404		P(T<=t) uni-caudal	0,013074	
t crítico uni-caudal	2,919986		t crítico uni-caudal	2,919986	
P(T<=t) bi-caudal	0,412808		P(T<=t) bi-caudal	0,026148	
t crítico bi-caudal	4,302653		t crítico bi-caudal	4,302653	

## APÊNDICE G.8. – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

	<b>Compressão (MPa)</b>						<b>Média (MPa)</b>
<b>ICA</b>	3,20	3,22	3,31	3,24	3,24	3,18	3,23
<b>MCA</b>	6,32	6,90	6,73	7,00	6,54	6,73	6,70
<b>IMA</b>	5,38	5,28	5,08	5,44	5,38	5,41	5,33
<b>MMA</b>	5,63	5,61	5,59	5,69	5,51	5,52	5,59
<b>ICB</b>	3,60	3,54	3,60	3,71	3,74	3,80	3,67
<b>MCB</b>	3,52	3,69	3,45	3,46	3,37	3,44	3,49
<b>IMB</b>	3,86	3,83	4,08	3,84	3,93	3,99	3,92
<b>MMB</b>	4,87	4,91	5,03	5,00	4,91	5,12	4,97

## APÊNDICE G.9. – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – MÉDIA E VARIÂNCIA - AMOSTRA A

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
ICA	6	19,39	3,231667	0,002017
MCA	6	40,22	6,703333	0,060347
IMA	6	31,97	5,328333	0,017697
MMA	6	33,55	5,591667	0,004657

## APÊNDICE G.10. – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 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	37,82078	3	12,60693	595,2513	1,02E-19	3,098391
Dentro dos grupos	0,423583	20	0,021179			
Total	38,24436	23				

## APÊNDICE G.11. – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA A

	<i>ICA</i>	<i>MCA</i>		<i>IMA</i>	<i>MMA</i>
Média	3,231667	6,703333	Média	5,328333	5,591667
Variância	0,002017	0,060347	Variância	0,017697	0,004657
Observações	6	6	Observações	6	6
Correlação de Pearson	0,211511		Correlação de Pearson	0,053243	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	5		gl	5	
Stat t	-35,4029		Stat t	-4,41072	
P(T<=t) uni-caudal	1,69E-07		P(T<=t) uni-caudal	0,003476	
t crítico uni-caudal	2,015048		t crítico uni-caudal	2,015048	
P(T<=t) bi-caudal	3,38E-07		P(T<=t) bi-caudal	0,006952	
t crítico bi-caudal	2,570582		t crítico bi-caudal	2,570582	

## APÊNDICE G.12. – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – MÉDIA E VARIÂNCIA - AMOSTRA B

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
ICB	6	21,99	3,665	0,00999
MCB	6	20,93	3,488333	0,012057
IMB	6	23,53	3,921667	0,009737
MMB	6	29,84	4,973333	0,008827

## APÊNDICE G.13. – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 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	7,961746	3	2,653915	261,4051	3,31E-16	3,098391
Dentro dos grupos	0,20305	20	0,010153			
Total	8,164796	23				

## APÊNDICE G.14. – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – MODELO ESTATÍSTICO TEST T - AMOSTRA B

	<i>ICB</i>	<i>MCB</i>		<i>IMB</i>	<i>MMB</i>
Média	3,665	3,488333	Média	3,921667	4,973333
Variância	0,00999	0,012057	Variância	0,009737	0,008827
Observações	6	6	Observações	6	6
Correlação de Pearson	-0,75537		Correlação de Pearson	0,614134	
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
gl	5		gl	5	
Stat t	2,201844		Stat t	-30,4083	
P(T<=t) uni-caudal	0,039455		P(T<=t) uni-caudal	3,61E-07	
t crítico uni-caudal	2,015048		t crítico uni-caudal	2,015048	
P(T<=t) bi-caudal	0,07891		P(T<=t) bi-caudal	7,22E-07	
t crítico bi-caudal	2,570582		t crítico bi-caudal	2,570582	

