

PAULA OLIVEIRA FIGUEIREDO

**Processos de cominuição de baixa energia para produção de
agregado miúdo reciclado de concreto**

São Paulo
2020

PAULA OLIVEIRA FIGUEIREDO

Processos de cominuição de baixa energia para produção de agregado miúdo reciclado de concreto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Mineral

Orientadora: Profa. Dra. Carina Ulsen

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de março de 2020

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Figueiredo, Paula
Processos de cominuição de baixa energia para produção de agregado miúdo reciclado de concreto / P. Figueiredo -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
115 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Reciclagem de resíduos de construção e demolição. 2.Liberação por cominuição. 3.Moagem de baixa energia. 4.Agregado miúdo reciclado de concreto. 5.Caracterização de resíduos. I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, Marco Antônio e Renata, e irmão, Gabriel.

Sem vocês nada teria sentido.

AGRADECIMENTOS

Faltam-me palavras para expressar o meu agradecimento aos meus pais! Eles quem vêm pavimentando os meus caminhos e me proporcionando sonhos reais, sendo, sobretudo, meus pilares de sustentação. Obrigada pelo apoio incondicional, tanto pessoal quanto profissional, durante toda a minha vida. Vocês são inspirações para uma sociedade carente de exemplos.

Ao meu irmão que desde a infância me ensina a matemática prática: nós nos dividimos, nos multiplicamos, nos subtraímos e, especialmente, nos somamos! Obrigada por tudo, principalmente pela parceria que se perde na cronologia do tempo (passado, presente e futuro).

À agência de fomento CAPES, pelo financiamento dos meus estudos no mestrado.

À minha orientadora, professora doutora Carina Ulsen, pela confiança e crescimento profissional proporcionado, sempre atenciosa e disponível. A você, minha eterna admiração!

Ao professor doutor Mauricio Bergerman, por todas as sugestões e críticas construtivas ao longo deste estudo, sempre acessível e solícito. Sem dúvidas sua colaboração foi fundamental para a realização desta dissertação.

Ao professor doutor Gábor Mucsi, pelo aceite em me supervisionar durante os estudos na University of Miskolc. Essa experiência não teria sido tão enriquecedora se eu não tivesse recebido os seus ensinamentos. Agradeço também pela paciência e hospitalidade, que me fez sentir “em casa” durante o período em que morei na Hungria.

À equipe do Laboratório de Caracterização Tecnológica da USP, pela excelente convivência, por dividir comigo esse ambiente de cooperação ímpar, o que naturalmente faz desse lugar tão especial! Foi um imenso prazer compartilhar minha rotina de trabalho com vocês.

Ao pós-doutorando Rafael Macedo, por todos os insights, pelas enriquecedoras discussões e por deixar o “mundo da química” mais palatável (rsrs).

Ao professor João Paiva, pela leitura minuciosa e correções ortográficas desta dissertação.

À Lívia, pela amizade sincera, que muitas vezes se fez força, ouvido (amigo) e abrigo (*home sweet home!*).

Aos amigos e colegas de profissão da USP, em especial os funcionários do LTM, LAPOL, LFQI e a Patrícia Santana, da University of Miskolc, da UNIFAL e do CMR por deixar essa trajetória mais leve e prazerosa. Vocês são risos mesmo no caos.

Aos amigos de Coqueiral, pela amizade perene e o pertencimento, não importa o tempo sem nos ver ou nos falar; nada muda, somos sintonia eterna!

Eu me sinto realizada por fazer da minha profissão uma ferramenta de autoconhecimento e ao mesmo tempo extensivo, pois me proporciona ajudar o próximo e a tornar esse mundo um lugar melhor - suprir as demandas atuais, sem causar ônus às futuras gerações. Afinal, uma vida pessoal feliz é pré-condição para poder sustentar um bom trabalho no longo prazo. “O que é a vida nós não sabemos, o que ela faz conosco, nós sabemos bem!”

“Se (me) faltar a paz,

Minas Gerais.”

RESUMO

O principal desafio para melhorar a qualidade dos agregados miúdos (ou areia) reciclados de concreto (AMRC) para uso como materiais de construção é a remoção da pasta de cimento porosa que permanece aderida na superfície dos agregados naturais. As propriedades do AMRC podem ser aprimoradas por meio de processos de cominuição capazes de promover a ruptura nessa zona de interface e, por conseguinte, liberar os agregados naturais; porém, o efeito do processamento mineral na reciclagem de resíduo de construção e demolição (RCD) é raramente abordado na literatura científica. Deste modo, o presente trabalho visa investigar a influência das operações de britagem e de moagem de baixa energia sobre as propriedades do AMRC. Para isso, avaliou-se, de forma comparativa, a liberação das fases dos resíduos de concreto, por britador de mandíbula e de impacto, na britagem primária e secundária, e, posteriormente, foram analisados os efeitos e interação das variáveis do moinho de bolas sobre a superfície do AMRC. A eficiência do processo de liberação e separação foram validados por testes de caracterização tecnológica e as tomadas de decisões por modelos estatísticos. Como resultado, o produto da britagem de impacto e de mandíbulas demonstraram ser semelhantes segundo as propriedades avaliadas; essa similaridade entre as propriedades confronta a teoria de que o britador de impacto gera um produto com menor teor de pasta de cimento e partículas ultrafina excessivas. Na moagem em moinho de bolas, os resultados apontaram para um aumento na qualidade do AMRC associado a um consumo de energia condizente para o processo quando se utiliza alta velocidade crítica, com diâmetros de bolas menores e maiores proporções de resíduo no moinho. Por fim, essa pesquisa visou contribuir para o desenvolvimento de processos eficientes de reciclagem de RCD, além de colaborar com a economia circular no setor de agregados ao potencializar o uso deste bem natural por maior tempo nas cadeias produtivas.

Palavras-chave: Reciclagem de resíduos de construção e demolição. Liberação por cominuição. Moagem de baixa energia. Agregado miúdo reciclado de concreto. Caracterização de resíduos.

ABSTRACT

The main challenge for improving the quality of recycled fine (or sand) concrete aggregate (RFCA) to use in building materials is the removal of porous cement paste that remains attached to natural aggregates surface. The properties of RFCA can be improved by comminution operations capable of promoting release between this interface zone and, consequently, liberate natural aggregates; however, the effect of mineral processing on recycling of construction and demolition waste (CDW) is rarely discussed in the scientific literature. Therefore, the present work aims to investigate the influence of crushing and milling on the properties of recycled fine. For this, the influence of the jaw and impact crusher on the primary and secondary stages was evaluated comparatively, and the effects and interaction of the ball mill variables on the RFCA surface were analyzed. The efficiency of the liberation and separation process was validated by technological characterization tests and decision-making by statistical models. As a result, the product of the impact and jaw crushers were found to be similar in properties evaluated; this similarity between properties confronts the theory that the impact crusher generates a product with lower cement paste grade and excessive ultrafine particles. In ball mill grinding, the data pointed to an increase in the quality of RFCA associated with an effective energy consumption when used a high critical speed, smaller diameters ball and higher waste ratios inside the mill. Finally, this research aims to contribute to developing efficient CDW recycling processes, besides collaborating with the circular economy in the aggregate sector by increasing the use of these natural resources for a longer time in the production chains.

Keywords: Recycling of construction and demolition waste. Comminution liberation. Low energy milling. Recycled fine concrete aggregate. Waste characterization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - NÚMERO E ANO DE DOCUMENTOS PUBLICADOS SOBRE “PRODUÇÃO DE AGREGADO RECICLADO” OU “AGREGADO RECICLADO” E “RCD” OU “RESÍDUO DE CONCRETO” E PAÍS DE ORIGEM DO DOCUMENTO.....	21
FIGURA 1.2 - NÚMERO E ANO DE DOCUMENTOS PUBLICADOS SOBRE “AREIA RECICLADA” OU “AGREGADO MIÚDO RECICLADO” E “RCD” OU “RESÍDUO DE CONCRETO” E PAÍS DE ORIGEM DO DOCUMENTO	21
FIGURA 1.3 - NÚMERO E ANO DE DOCUMENTOS PUBLICADOS SOBRE “AREIA RECICLADA” OU “AGREGADO MIÚDO RECICLADO” E “RCD” OU “RESÍDUO DE CONCRETO E PROCESSAMENTO MINERAL” OU “SEPARAÇÃO” OU “LIBERAÇÃO POR COMINUIÇÃO” E PAÍS DE ORIGEM DO DOCUMENTO.....	22
FIGURA 2.1 – PANORAMA DAS PRINCIPAIS ATIVIDADES E PERSPECTIVAS DO RCD NO BRASIL	27
FIGURA 2.2 - LIBERAÇÃO POR COMINUIÇÃO ENTRE O AGREGADO NATURAL E A PASTA DE CIMENTO	30
FIGURA 2.3 – LIBERAÇÃO ENTRE AS FASES AO REDUZIR O TAMANHO DAS PARTÍCULAS	31
FIGURA 2.4 – CINÉTICA DE FRAGMENTAÇÃO QUE CONDUZEM À FRATURA DE UMA PARTÍCULA POR BRITAGEM.....	32
FIGURA 2.5 – REGIME DE OPERAÇÃO DO MOINHO	35
FIGURA 2.6 – REDUÇÃO DE VAZIO NA AMOSTRA AO COMBINAR DIFERENTES TAMANHOS DE PARTÍCULAS.....	43
FIGURA 2.7 - GABARITO COMPARATIVO PARA ANÁLISE VISUAL MORFOLÓGICA DAS PARTÍCULAS.....	44
FIGURA 2.8 - CORRELAÇÃO ENTRE A RAZÃO DE ASPECTO (B/L) E A ESFERICIDADE DE AREIAS COMERCIAIS (MEDIDAS DO EQUIPAMENTO CAMSIZER)	46
FIGURA 2.9 – CONDIÇÃO DE UMIDADE DE AGREGADOS POROSOS	49
FIGURA 3.1 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	51
FIGURA 3.2 - AMOSTRA DE RESÍDUO DE CONCRETO ESTUDADA COMPOSTA POR MATERIAIS PÉTREOS E PASTA DE CIMENTO POROSA NA SUPERFÍCIE DAS PARTÍCULAS	52
FIGURA 3.3 - PILHA DE HOMOGENEIZAÇÃO ALONGADA COM TODA AMOSTRA COLETADA	52
FIGURA 3.4 - PROCEDIMENTO PARA HOMOGENEIZAÇÃO DA AMOSTRA	53
FIGURA 3.5 - ANÁLISE TEXTURAL DA AMOSTRA	54

FIGURA 3.6 - BRITAGEM DE RESÍDUO DE CONCRETO E PROCEDIMENTO PARA PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....	54
FIGURA 3.7 – MEDIDOR DE ENERGIA ACOPLADO AO MOINHO DE BOLAS (A) E PAINEL DO MEDIDOR DE ENERGIA (B).....	55
FIGURA 3.8 – INVERSOR OMRON SYSDRIVE 3G3MV	58
FIGURA 3.9 - DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO SSS EM QUE (A) SSS NÃO FOI ALCANÇADO E (B) SSS FOI ATINGIDO	62
FIGURA 4.1 - ANÁLISE COMPARATIVA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA ENTRE AS ALÍQUOTAS A E B DO BI E BM OBTIDAS POR DIFERENTES TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	64
FIGURA 4.2 - DISTRIBUIÇÃO EM MASSA DOS PRODUTOS APÓS BRITAGEM EM BRITADORES DE MANDÍBULAS E DE IMPACTO	65
FIGURA 4.3 - ANÁLISE MORFOLÓGICA COMPARATIVA DO PRODUTO DE BI E BM	66
FIGURA 4.4 – CORRELAÇÃO ENTRE A DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ COM OS TEORES DE $CaO+PF$	68
FIGURA 4.5 - PROPORÇÃO RELATIVA ENTRE QUARTZO E ALUMINOSSILICATOS A PARTIR DA RELAÇÃO $SiO_2/(K_2O+Na_2O)$ NO PRODUTO DE BI E BM.....	69
FIGURA 4.6 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA SEMIQUANTITATIVA DOS PRODUTOS DE BRITAGEM (A) E PROPORÇÃO DE CALCITA E QUARTZO POR INTERVALO GRANULOMÉTRICO (B)	70
FIGURA 4.7 - COMPARATIVO DO CONTEÚDO ESTIMADO DE PASTA DE CIMENTO POR FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	71
FIGURA 4.8 – RELAÇÃO GRANULOQUÍMICA ENTRE O CaO E A PF (A) E $CaO+PF$ COM $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (B).....	73
FIGURA 4.9 – TEORES DE SÍLICA (A) E ÓXIDO DE CÁLCIO (B) POR FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA	74
FIGURA 4.10 – ANÁLISE COMPARATIVA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (A) E ESFERICIDADE (B) DO AMRC PRODUZIDO POR DIFERENTES VELOCIDADES DE OPERAÇÃO DO MOINHO.....	76
FIGURA 4.11 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E DESVIO PADRÃO DE CADA AMOSTRA DE AMRC PRODUZIDA POR DIFERENTES VELOCIDADES CRÍTICAS DO MOINHO.....	76
FIGURA 4.12 – RELAÇÃO ENTRE A ABSORÇÃO DE ÁGUA E A PORCENTAGEM EM MASSA DE MATERIAL ULTRAFINO (<0,15 mm) NOS AMRC OBTIDOS POR DIFERENTES VELOCIDADES DE OPERAÇÃO DO MOINHO	77

FIGURA 4.13 – DISTRIBUIÇÃO EM MASSA DOS AMRC OBTIDOS POR DIFERENTES VELOCIDADES CRÍTICAS	78
FIGURA 4.14 – ANÁLISE COMPARATIVA EM MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE CONCRETO ANTES (A) E APÓS (B) A MOAGEM EM VELOCIDADE CRÍTICA DE 80%	79
FIGURA 4.15 - ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (A) E ESFERICIDADE DA PARTÍCULA (B) AO VARIAR O TEMPO DE MOAGEM	81
FIGURA 4.16 - RESULTADO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E SEU DESVIO PADRÃO GERADOS POR DIFERENTES TEMPOS DE MOAGEM	81
FIGURA 4.17 - RELAÇÃO ENTRE ENERGIA ESPECÍFICA E CONSUMIDA POR TEMPO DE MOAGEM (A), E O CONSUMO DE ENERGIA POR PERCENTUAL DE PARTÍCULA ULTRAFINA PASSANTE EM 0,15 MM (B).....	82
FIGURA 4.18 - ANÁLISE COMPARATIVA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (A) E ESFERICIDADE DA PARTÍCULA (B) AO VARIAR O DIÂMETRO DAS BOLAS	84
FIGURA 4.19 – RESULTADO DO TESTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA AO MODIFICAR O DIÂMETRO DAS BOLAS	84
FIGURA 4.20 – DISTRIBUIÇÃO EM MASSA DOS AMRC PRODUZIDOS POR DIFERENTE DIÂMETRO DE BOLAS	85
FIGURA 4.21 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (A) E ESFERICIDADE DA PARTÍCULA (B) AO VARIAR O TEMPO E A PROPORÇÃO EM MASSA DENTRO DO MOINHO.....	87
FIGURA 4.22 – RESULTADO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA AO VARIAR O TEMPO E A PROPORÇÃO EM MASSA DENTRO DO MOINHO	87
FIGURA 4.23 – PARTIÇÃO EM MASSA DOS AMRC PRODUZIDOS AO VARIAR O TEMPO E O ENCHIMENTO DENTRO DO MOINHO	88
FIGURA 4.24 – RELAÇÃO ENTRE ENERGIA ESPECÍFICA E CONSUMIDA POR PROPORÇÃO EM MASSA (A), E O CONSUMO ENERGÉTICO POR PERCENTUAL DE PARTÍCULA ULTRAFINA PASSANTE EM 0,15 MM (B).....	89
FIGURA 4.25 – RELAÇÃO ENTRE ENERGIA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E MATERIAL ULTRAFINO PARA CADA CONDIÇÃO	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - PANORAMA DA GERAÇÃO E RECICLAGEM DE RCD EM DIFERENTES PAÍSES ...	26
TABELA 2.2 – DADOS DESCRITOS EM LITERATURA SOBRE AR PRODUZIDOS POR BRITADORES DE MANDÍBULAS E DE IMPACTO	34
TABELA 2.3 – ROTAS DE PROCESSOS PARA PRODUÇÃO DE AGREGADO MIÚDO RECICLADO	38
TABELA 2.4 – ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA APLICAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO PARA DIFERENTES NORMAS	50
TABELA 3.1 - CONDIÇÕES FIXAS DOS ENSAIOS DE MOAGEM	56
TABELA 3.2 - VARIÁVEIS TESTADAS DO MOINHO DE BOLAS PARA MOAGEM SELETIVA.....	56
TABELA 3.3 – FREQUÊNCIA DO EQUIPAMENTO EM HERTZ (Hz), VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO MOINHO EM ROTAÇÃO POR MINUTO (Vc RPM) E VELOCIDADE CRÍTICA EM PORCENTAGEM (Vc %).....	57
TABELA 4.1 - SUMÁRIO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS PRODUTOS OBTIDOS POR BRITAGEM	67
TABELA 4.2 - ABSORÇÃO DE ÁGUA (0,15 MM – 4,8 MM), RESÍDUO SOLÚVEL (0,075 MM – 4,8 MM) E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	72
TABELA 4.3 - CONFIGURAÇÕES DO MOINHO DE BOLAS E A ENERGIA CONSUMIDA PARA CADA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE CRÍTICA	75
TABELA 4.4 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA AO OSCILAR A VELOCIDADE CRÍTICA	78
TABELA 4.5 - PARÂMETROS DO MOINHO DE BOLAS E O CONSUMO DE ENERGIA PARA CADA TEMPO DE MOAGEM.....	80
TABELA 4.6 - RESULTADO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA, DESVIO PADRÃO E ANÁLISES ESTATÍSTICAS POR DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT AO VARIAR O TEMPO DE MOAGEM....	83
TABELA 4.7 - CONFIGURAÇÕES DO MOINHO DE BOLAS E O CONSUMO DE ENERGIA AO ALTERAR O DIÂMETRO DAS BOLAS.....	84
TABELA 4.8 - CONFIGURAÇÕES DO MOINHO DE BOLAS E ENERGIA CONSUMIDA COM A ALTERAÇÃO DO TEMPO DE MOAGEM E PROPORÇÃO EM MASSA DENTRO DO MOINHO ...	86
TABELA 4.9 – DADOS DA ENERGIA CONSUMIDA E PORCENTAGEM DE FRAÇÃO ULTRAFINA GERADA COM ALTERAÇÃO DO TEMPO DE MOAGEM E A PROPORÇÃO EM MASSA DENTRO DO MOINHO.....	89
TABELA 4.10 – SUMÁRIO DAS CONDIÇÕES DE MOAGEM DE BAIXA ENERGIA EM MOINHO DE BOLAS PARA PRODUÇÃO DE AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE CONCRETO	91

TABELA 6.1 – MATRIZ EXPERIMENTAL DO PLANEJAMENTO FATORIAL DOS ENSAIOS DE MOAGEM IDEALIZADO.....	98
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Absorção de Água

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

AID – Análise de Imagens Dinâmica

AMR – Agregado Miúdo Reciclado

AMRC – Agregado Miúdo Reciclado de Concreto

AR – Agregado Reciclado

ARC – Agregado Reciclado de Concreto

BI – Britador de Impacto

BM – Britador de Mandíbulas

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RC – Resíduo de Concreto

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

SSS – Superfície Saturada Seca

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	19
1.2	RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	20
1.3	OBJETIVO.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	24
2.2	RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	25
2.2.1	<i>Definição e disseminação da reciclagem de RCD</i>	25
2.2.2	<i>Desafios na reciclagem de RCD</i>	28
2.3	O EFEITO DO PROCESSAMENTO MINERAL NA RECICLAGEM DE RCD.....	29
2.3.1	<i>A influência dos diferentes mecanismos de cominuição nas propriedades do agregado reciclado</i>	32
2.3.2	<i>Processos de cominuição para produção de agregado miúdo reciclado</i>	36
2.4	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS RECICLADOS.....	42
2.4.1	<i>Distribuição de tamanho das partículas</i>	42
2.4.2	<i>Morfologia das partículas</i>	43
2.4.3	<i>Composição química e mineralógica</i>	47
2.4.4	<i>Teor da pasta de cimento</i>	48
2.4.5	<i>Absorção de água</i>	49
3	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	51
3.2	AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....	51
3.3	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS MECANISMOS DE BRITAGEM.	53
3.4	MOAGEM DE BAIXA ENERGIA PARA REMOÇÃO DA PASTA DE CIMENTO SUPERFICIAL.....	55
3.5	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AGREGADO RECICLADO.....	60

3.5.1	<i>Distribuição granulométrica e morfológica das partículas</i>	60
3.5.2	<i>Composição química e mineralógica</i>	60
3.5.3	<i>Absorção de água</i>	61
3.5.4	<i>Teor da pasta de cimento</i>	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1	BRITAGEM PARA AVALIAÇÃO DA LIBERAÇÃO	64
4.1.1	<i>Distribuição granulométrica e morfologia das partículas</i>	64
4.1.2	<i>Composição química</i>	67
4.1.3	<i>Composição mineralógica</i>	70
4.1.4	<i>Teor da pasta de cimento e teste de absorção de água</i>	71
4.1.5	<i>Conclusões parciais sobre a influência do mecanismo de britagem na liberação das fases</i>	73
4.2	MOAGEM DE BAIXA ENERGIA PARA REMOÇÃO DA PASTA DE CIMENTO SUPERFICIAL	75
4.2.1	<i>Velocidade de operação do moinho</i>	75
4.2.2	<i>Tempo de moagem</i>	80
4.2.3	<i>Diâmetro da bola de moagem</i>	83
4.2.4	<i>Proporção em massa dentro do moinho</i>	86
4.2.5	<i>Conclusões parciais do efeito da moagem de baixa energia nas propriedades do agregado miúdo reciclado</i>	90
5	CONCLUSÕES	95
6	LIMITAÇÕES DA PESQUISA E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS INVESTIGAÇÕES	97
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
	APÊNDICE A	110
	APÊNDICE B	112
	APÊNDICE C	113

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é responsável por realizar o desenvolvimento e a infraestrutura em um país, o que faz desse setor o maior consumidor de matérias-primas não renováveis que, além da edificação, demanda por recursos naturais adicionais para manutenção. Em função disso, o setor é também responsável por um relevante consumo de energia, água e geração de poluentes (VARELA e TORRES, 2019).

Dentre as preocupações com a sustentabilidade no meio ambiente construído, há a busca pela viabilização da reciclagem integral dos resíduos provenientes de obras de construção e demolição (RCD). A sua reciclagem contribuirá para o aumento da vida útil de jazidas minerais, maior disponibilidade dos recursos naturais destinados ao setor construtivo e eliminação da disposição inadequada desses resíduos; práticas que estão alinhada com a política internacional de desenvolvimento sustentável e preservação ambiental (UN, 2015).

Em contrapartida, nas usinas de reciclagem de RCD descritas em literatura, o foco está na produção de agregados graúdos reciclado. A fração de agregados miúdos (areia), apesar de representar entre 40 e 60% em massa do produto reciclado (ANGULO et al, 2009; ULSEN et al, 2013; MARTÍNEZ et al, 2018), é usualmente destinada à aplicação de pavimentos e assentamento de tubos ou descartada como resíduo da própria reciclagem (POON e CHAN, 2007; RODRIGUES et al, 2013).

A limitação ao reintroduzir o agregado miúdo reciclado de concreto em obras de infraestruturas como materiais cimentícios, refere-se à pasta de cimento porosa remanescente de construções anteriores que permanece aderida à superfície dos agregados naturais, sendo responsável pela redução da qualidade do agregado reciclado (HANSEN, 1986; KOBAYASHI e KAWANO, 1988; MEHTA e MONTEIRO, 1994; LAMOND et al, 2002; CHEN e YEN e CHEN, 2003; YACOUB e DJERBI e FEN-CHONG, 2018). Por outro lado, estudos têm demonstrado que essa particularidade pode ser melhor controlada por processos de cominuição capazes de promover a ruptura na zonas de transição interfacial, de modo a liberar a pasta de

cimento do agregado (KIM e CHO e AHN, 2012; EVANGELISTA et al, 2015; OMARY e GHORBEL e WARDEH, 2016).

No tratamento mineral, não há uma rota de processo padrão a ser seguido. Deste modo, ao selecionar os métodos de fragmentação a ser utilizado, deve-se certificar se estão de acordo com os preceitos convenientes de liberação do material a ser beneficiado. Essa condição é raramente avaliada em centrais de reciclagem, além de serem escassos os estudos que oferecem uma análise comparativa entre os diferentes mecanismos de cominuição com vista à qualidade de agregado reciclado de concreto (BRAYMAND et al, 2017; DILBAS e ÇAKIR e ATIS, 2019).

Assim, essa pesquisa visa avaliar a influência dos processos de cominuição de baixa energia para produção de agregado miúdo reciclado de concreto, com intuito de elevar a qualidade do produto.

1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Capítulo 1 - Introdução: Introduce o leitor à relevância e justificativa desta pesquisa frente à comunidade científica e as linhas atuais de pesquisa abordadas mundialmente.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica: Apresenta a disseminação e os desafios da reciclagem dos resíduos de construção e demolição. Conceitua o efeito do tratamento mineral sobre as propriedades do agregado reciclado de concreto e enfatiza as diferentes rotas de processamento para a produção de agregado miúdo reciclado. Adicionalmente, descreve as principais técnicas de caracterização tecnológica para controle de qualidade do agregado reciclado.

Capítulo 3 - Materiais e métodos: Detalha o procedimento experimental e os materiais estudados de modo a atingir o objetivo da pesquisa.

Capítulo 4 – Resultados e discussões: Apresenta uma avaliação comparativa dos britadores de mandíbulas e de impacto na liberação das fases constituintes dos agregados reciclados de concreto. Posteriormente, varia os parâmetros de operação de um moinho de bolas com vista à adequação do equipamento, de modo a

promover a moagem seletiva da pasta de cimento - moagem de baixa energia para remoção da pasta de cimento superficial.

Capítulo 5 – Conclusões: Reitera as informações relevantes da dissertação e destaca as principais influências dos processos de cominuição de baixa energia sobre as propriedades do agregado miúdo reciclado de concreto.

Capítulo 6 – Limitações da pesquisa e recomendações para futuras investigações: Aborda os desafios enfrentados na execução desta dissertação e, frente às informações levantadas, compartilha sugestões para a estruturação e desenvolvimento de trabalhos complementares.

1.2 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

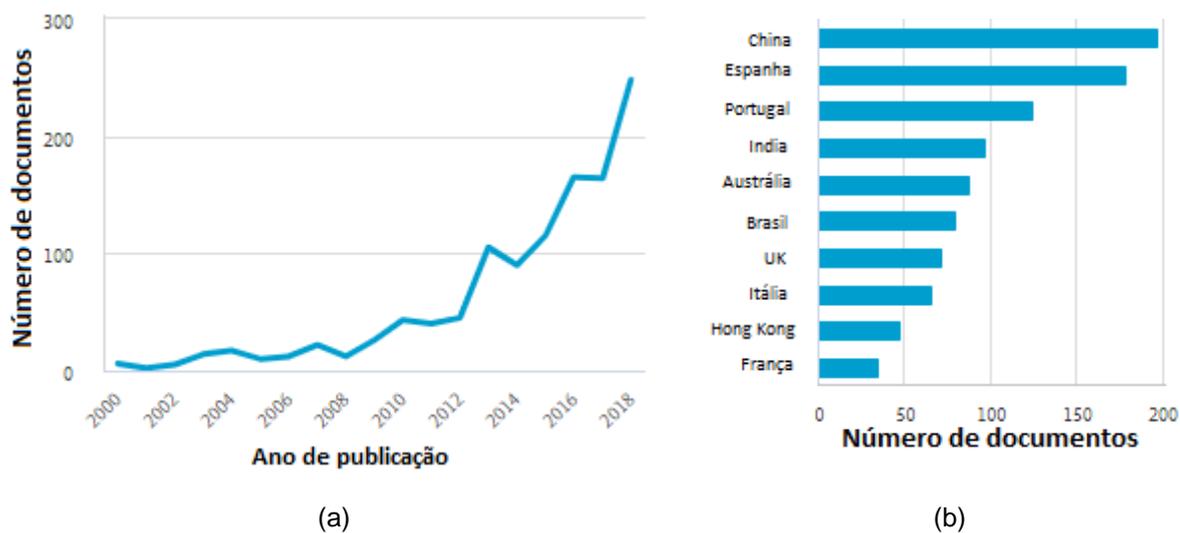
A visualização integrada da base de dados do sistema Scopus (SCOPUS, 2019), de resumos e citações de literaturas mundiais, permite compreender, em caráter exploratório, a relevância do tema desta pesquisa frente à comunidade científica e as linhas de pesquisa atualmente abordadas.

Os filtros de busca aplicados para o direcionamento da pesquisa, ao se considerar as combinações das palavras e expressões exclusivamente constantes em título, resumo ou palavras-chave de documentos, identificam um total de:

- 1.337 trabalhos sobre ("recycled aggregate production" ou "recycled aggregate") e ("construction and demolition waste" ou "concrete waste"), sendo que a China é responsável pela maior parte dessas publicações, conforme ilustra a Figura 1.1;
- 482 trabalhos sobre ("recycled sand production" ou "fine recycled aggregate") e ("construction and demolition waste" ou "concrete waste"), e a origem desses documentos é majoritariamente da Espanha, como apresenta a Figura 1.2;
- 28 trabalhos sobre ("mineral processing" ou "separation" ou "liberation comminution") e ("recycled sand production" ou "fine recycled aggregate") e ("construction and demolition waste" ou "concrete waste"),

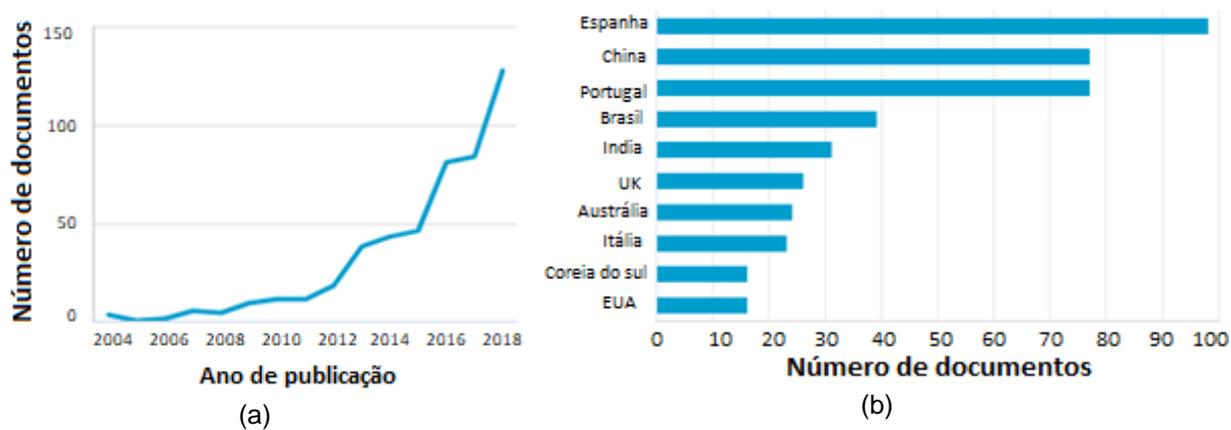
sendo o Brasil o país com maior número de documentos publicados, como demonstra a Figura 1.3.

Figura 1.1 - Número e ano de documentos publicados sobre “produção de agregado reciclado” ou “agregado reciclado” e “RCD” ou “resíduo de concreto” e país de origem do documento



Fonte: Scopus (2019).

Figura 1.2 - Número e ano de documentos publicados sobre “areia reciclada” ou “agregado miúdo reciclado” e “RCD” ou “resíduo de concreto” e país de origem do documento



Fonte: Scopus (2019).

Figura 1.3 - Número e ano de documentos publicados sobre “areia reciclada” ou “agregado miúdo reciclado” e “RCD” ou “resíduo de concreto e processamento mineral” ou “separação” ou “liberação por cominuição” e país de origem do documento



Fonte: Scopus (2019).

Verifica-se que as pesquisas relacionadas à reciclagem de resíduos de construção e demolição com vista à produção de agregado reciclado são notadamente recentes e está em ascensão (Figura 1.1 (a)). Além disso, após 2002, observa-se que em um total de 1.337 publicações, apenas 36% destes trabalhos, publicados predominantemente pela Espanha, China e Portugal, mencionam a produção de “agregado miúdo reciclado” (Figura 1.2 (b)).

No que se refere aos estudos sobre os processos de cominuição utilizados para produzir agregado miúdo reciclado, inclina-se para um volume de 28 documentos publicados, portanto, 2% do total das publicações nesta área.

Assim, a base de dados do sistema Scopus evidencia a existência de uma lacuna no campo científico sobre a influência dos processos de cominuição para produção de agregado miúdo reciclado.

1.3 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é investigar a influência dos processos de cominuição de baixa energia para produção de agregado miúdo reciclado de concreto. Para isso, este trabalho foi dividido em quatro etapas:

- 1) **Amostragem e preparação da amostra:** etapas de homogeneização e amostragem, a fim de mitigar a heterogeneidade e aumentar a representatividade do material, fator de suma importância para não enviesar os resultados comparativos entre alíquotas distintas;
- 2) **Processos de cominuição por britagem:** avaliação comparativa da influência dos britadores de mandíbulas e de impacto na liberação das fases constituintes dos agregados reciclados, sendo estes os britadores mais comumente utilizados na reciclagem de RCD;
- 3) **Processos de cominuição por moagem:** investigar a melhor configuração do moinho de bolas de Bond, tendo em vista a remoção seletiva da pasta de cimento aderida à superfície do agregado em um eficiente consumo de energia no processo;
- 4) **Caracterização das propriedades do agregado miúdo reciclado:** avaliar as características do agregado reciclado e dar suporte às atividades de processamento, de modo a controlar a qualidade da produção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os agregados para construção civil, areia e brita, são matérias-primas minerais granulares, sem forma e volume definido, podendo ser natural ou artificial e com especificações técnicas adequadas à aplicação (DNPM, 2015). Essas especificações apresentam variações para cada país, sendo no Brasil definidos, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas por meio da NBR 9935 (ABNT, 2005), como:

- $4,75 \text{ mm} < d \leq 75 \text{ mm}$: agregados graúdos;
- $0,15 \text{ mm} < d \leq 4,75 \text{ mm}$: agregados miúdos;
- $d \leq 0,15 \text{ mm}$: ultrafino ou *filler*.

As propriedades dos agregados dependem da composição mineralógica da rocha de formação, dos processos de intemperismos a que essa rocha foi submetida e dos métodos de cominuição utilizado no tratamento mineral (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Já o valor comercial é influenciado pela distância de transporte entre o produtor e o consumidor; deste modo, sugere-se que a produção do agregado seja no entorno do local de interesse devido ao seu baixo valor unitário (LA SERNA e REZENDE, 2009). Entretanto, com a crescente demanda por agregado natural, tem-se alertado quanto a sua disponibilidade próximo às áreas densamente povoadas, como é o caso da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) que se encontra em escassez de areia desde 2001 (WHITAKER, 2001).

A escassez da areia natural – agregado miúdo – em regiões metropolitanas está relacionada à esterilização de bacias sedimentares por áreas densamente povoadas, oposições de vizinhanças frente ao empreendimento mineiro e restrições ambientais à utilização de várzeas e leitos de rios para extração. Como decorrência, nota-se um aumento entre 100 km e 250 km de distância da matéria-prima ao consumidor, o que faz com que essas regiões apresentem o maior preço nacional de venda de areia natural, valor que pode chegar a R\$ 100,00 por metro cúbico (dados coletados por pesquisa de campo).

Neste contexto, pesquisas estão sendo realizadas para elevar a disponibilidade da areia que, após a água, é o bem mineral mais consumido no mundo (DNPM, 2015), e para melhorar o aproveitamento dos RCD ressalva a produção de agregado miúdo reciclado.

2.2 RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.2.1 Definição e disseminação da reciclagem de RCD

Os resíduos de construção e demolição (RCD) - comumente denominados como entulhos - são oriundos de obras de construção civil, reformas e demolições, sendo compostos por uma ampla variedade de materiais, tais como: blocos cerâmicos, concreto, rochas, argamassa, gesso, pavimento asfáltico, aço, plástico, vidro, madeira, solo, dentre outros elementos (CONAMA, 2002). Além disso, a composição do RCD varia entre os países de sua origem e de acordo com a época em que a construção foi realizada.

Os RCD podem ser classificados em materiais inerte, não inerte e perigoso. Os resíduos inertes se caracterizam por não passar por quaisquer transformações físicas ou químicas com o passar do tempo, portanto, não liberam substâncias que possam ser prejudiciais ao meio ambiente, sendo esses os materiais reutilizados ou reciclados na forma de agregados como matéria-prima. Os resíduos não inertes possuem ao menos uma propriedade como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, fatores que contribuem para a degradação da qualidade ambiental. Os perigosos são os resíduos que apresentam composições prejudiciais à saúde (CONAMA, 2002).

A geração de RCD pode ser quantificada por, pelo menos, três formas: área construída, movimentação de cargas por coletores e monitoramento de descargas (PINTO, 1999); a Tabela 2.1 exibe uma estimativa da geração dos RCD em diferentes países e o quanto do resíduo é reciclado. Em virtude das abundantes áreas receptoras de resíduos na malha urbana, bem como os descartes ilegais recorrentes, o seu monitoramento é de complexa verificação, o que dificulta o levantamento de dados consistentes sobre a sua gestão, e, conseqüentemente,

compromete com a real percepção do problema (SILVA e DE BRITO e DHIR, 2017; MARTÍNEZ et al, 2018).

Tabela 2.1 - Panorama da geração e reciclagem de RCD em diferentes países

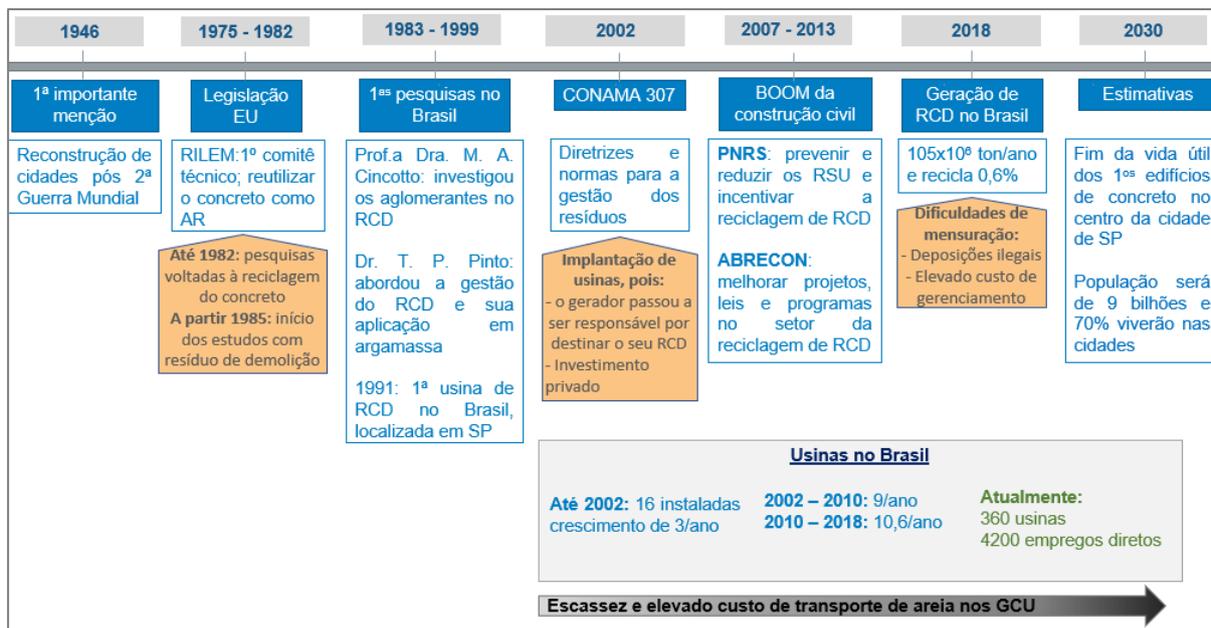
País	RCD reciclado (%)	Geração de RCD (x10 ⁶ t/ano)	Densidade demográfica (hab/km ²)
Holanda	98	23,9	405,6
Dinamarca	94	5,27	130
Estônia	92	1,51	29
Alemanha	86	72,4	230
Irlanda	80	2,5	29
Reino Unido	75	99,1	256
Bélgica	68	11	342
Áustria	60	6,6	100
Eslovênia	53	2	100
Espanha	14	10,5	97,6
Portugal	5	11,4	112,5
Brasil	0,6	105	23

Fonte: Torres (2018) e European Commission (2015).

As áreas de transbordo e triagem são responsáveis por coletar e separar os RCD, e, em seguida, destiná-los às usinas de reciclagem ou aterros licenciados. Geralmente, as usinas de reciclagem classificam os RCD em três classes de acordo com a sua composição, avaliada visualmente pela cor, sendo: cinza (composto majoritariamente por concreto), vermelho (cerâmica, telhas de barro e congêneres) e misto (combinação entre eles) (TORRES, 2018). Sobretudo, recomenda-se que esses resíduos sejam integralmente reutilizados, reciclados ou dispostos em aterros licenciados de resíduos inertes da construção de modo a permitir sua utilização futura (CONAMA, 2002).

A reutilização do RCD é datada desde a era medieval, porém, os estudos científicos sobre a sua reciclagem foram iniciados após a Segunda Guerra Mundial tendo em vista a reconstrução de cidades europeias. A partir de então, pesquisas e normativas são crescentes mundialmente, porém, no âmbito nacional, a reciclagem de RCD ainda é incipiente (TORRES, 2018); a Figura 2.1 apresenta uma visão holística juntamente com as perspectivas desse setor.

Figura 2.1 – Panorama das principais atividades e perspectivas do RCD no Brasil



Obs: RCD = resíduo de construção e demolição, AR = agregado reciclado, RSU = resíduo sólido urbano, PNRS = Plano Nacional de Resíduos Sólidos, ABRECON = Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição, GCU = grandes centros urbanos.

Fonte: Própria (2019).

A reciclagem de RCD no Brasil foi impulsionada em 2002 após aprovação da normativa desenvolvida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA - resolução 307) em que se estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão desses resíduos, além de firmarem que os geradores seriam responsáveis por destinar seus resíduos. Em suma, as principais propostas foram: a criação de aterros de inertes para receber os resíduos, e a utilização de equipamentos de britagem com intuito de gerar agregados reciclados (AR) de RCD a ser destinado à estabilização de solo e sub-bases de pavimentação (CONAMA, 2002). No entanto, essas alternativas não solucionam a economia circular do agregado natural, sendo a primeira paliativa em médio prazo, pelo fato do aterro ter uma vida útil finita, e a segunda não ser capaz de absorver todo o resíduo gerado.

Em adicional, os primeiros edifícios de grande porte construídos no centro da cidade de São Paulo são da década de 1970 e, de acordo com a diretriz brasileira NBR 6118 (2004), a vida útil de estruturas de concreto para esse fim é de aproximadamente 50 anos. Portanto, prevê-se o aumento da geração de RCD na RMSP nos próximos 10 anos. Assim, desenvolver novos mercados e melhorias na

qualidade do AR são fatores cruciais para ampliar as taxas de reciclagem de modo a suprir as demandas atuais e absorver todo o resíduo gerado.

2.2.2 Desafios na reciclagem de RCD

A geração de resíduos na malha urbana é contínua e, diferentemente das jazidas de agregados naturais, não irão escassear no longo prazo. Portanto, aumentar a circularidade dos recursos naturais destinados ao setor construtivo são essenciais, mas não é o suficiente (JOHN, 2018), pois exige mudanças, tais como:

- No processo de gestão de RCD municipais e fiscalização da destinação desses resíduos de modo a possibilitar a rastreabilidade do seu transporte;
- Na qualidade do RCD que são destinados às usinas de reciclagem, sendo que os problemas de contaminação podem ser mitigados por triagem dos materiais, onde são removidos os elementos orgânicos e ferrosos, ou por demolição seletiva, ação precedente à demolição;
- Eficiência no processamento dos resíduos a fim de se obter agregados reciclados com propriedades adequadas para uso em aplicações de maior valor agregado;
- Na melhoria dos métodos de caracterização utilizados para avaliar a qualidade do agregado reciclado;
- Na legislação vigente, como por exemplo a desoneração fiscal como um fomento ao desenvolvimento de projetos sustentáveis, tanto em eficiência energética de produto quanto de processo produtivo, associado à penalização de atividades predatórias ao meio ambiente.

Os desafios na reciclagem de RCD estão interligados com as mudanças na atual logística reversa. Assim, a geração de receita no recebimento do RCD somados aos incentivos no sistema tributário proporcionam maiores investimentos em tecnologias eficientes de caracterização e processamento em usinas de reciclagem, por conseguinte, eleva a qualidade e a confiabilidade do produto e amplia as possibilidades de uso do agregado reciclado, principalmente da fração do agregado miúdo (0,15 mm - 4,8 mm) e ultrafinos (<0,15 mm), ambos com aplicações

mais restrita (EVANGELISTA e DE BRITO, 2007; GONÇALVES e DE BRITO, 2010; ULSEN et al, 2018).

2.3 O EFEITO DO PROCESSAMENTO MINERAL NA RECICLAGEM DE RCD

O princípio do processamento mineral está relacionado à separação física das partículas após uma força externa ser aplicada a elas que, por sua vez, respondem de maneiras diferentes em função de sua composição e/ou granulometria (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982). Para que o processamento seja eficiente espera-se que duas condições sejam satisfeitas: liberação e separação, sendo que a segunda é impraticável se a primeira não for bem sucedida (GAUDIN, 1932).

O processo de liberação por redução de tamanho do material é denominado como cominuição¹, seja por desmonte de rochas, britagem ou moagem (FLINTOFF e HERBST e LO, 2003). Essas operações se distinguem pela faixa granulométrica de alimentação, mecanismos de fragmentação, adequação do material para as etapas de concentração mineral subsequentes e/ou produto desejável (TAGGART, 1945; WILLS e NAPIER-MUNN, 2006). Entretanto, não há um circuito padrão a ser seguido, de modo que as operações devem ser realizadas dentro dos preceitos convenientes de liberação do material a ser beneficiado.

O beneficiamento mineral aplicado à reciclagem de RCD é semelhante àqueles utilizados na produção de agregado natural, sendo essencialmente composto por processos de cominuição, separação magnética - para remoção do aço advindo da construção - e separação granulométrica. Quanto à mobilidade na implantação da usina de beneficiamento, as usinas de agregado natural necessariamente devem estar instaladas no local da ocorrência mineral enquanto as centrais de reciclagem podem ser fixas (implantada em um determinado local), móveis (equipamentos passíveis de realocação em função da geração dos resíduos) ou semi-fixas (DE BRITO, 2017).

¹ Na indústria mineral, o termo cominuição também engloba a classificação, que não atua como uma operação unitária de redução granulométrica, mas está inserida no processamento devido a contribuição na eficiência energética e desempenho do processo.

A reciclagem de resíduo de concreto (RC) gera AR compostos de pasta de cimento, agregados (brita e areia), água e, eventualmente, misturas ou materiais de substituição parcial do cimento (EVANGELISTA et al, 2015), em diferentes proporções. A pasta de cimento aderida à superfície do agregado reduz a qualidade do agregado reciclado, sendo a principal propriedade que o diferencia do agregado natural. Assim, ao selecionar o método de cominuição a ser empregado na reciclagem, almeja-se que o tratamento mineral alcance uma divisão entre as zonas de interface dos grãos de modo a liberar, principalmente, a pasta de cimento do agregado (KIM e CHO e AHN, 2012), conforme ilustra a Figura 2.2.

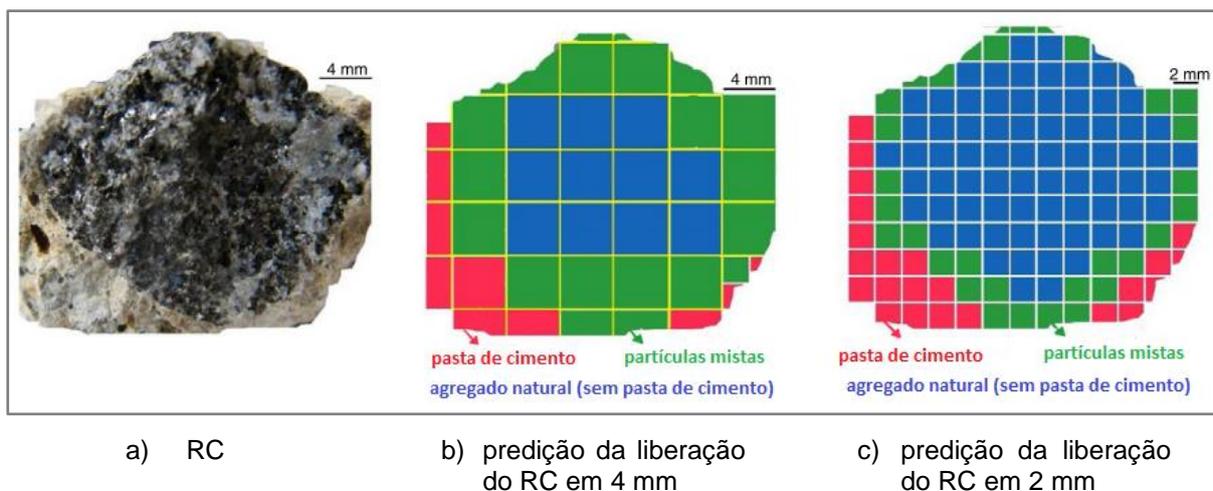
Figura 2.2 - Liberação por cominuição entre o agregado natural e a pasta de cimento



Fonte: modificado de Ulsen (2011).

Adicionalmente, Ulsen et al (2018) apresentaram o efeito da fragmentação na liberação do agregado reciclado de concreto (ARC) (Figura 2.3). Em síntese, ao reduzir o tamanho das partículas (Figura 2.3 (c)), há uma maior probabilidade de se obter um agregado natural livre de pasta de cimento associado a um menor volume de partículas mistas (composto por agregado e pasta de cimento) no produto.

Figura 2.3 – Liberação entre as fases ao reduzir o tamanho das partículas



Fonte: modificado de Ulsen et al (2018).

A pasta de cimento possui menor resistência à fragmentação ao se comparar com o agregado natural. Deste modo, ao cominuir o RC, a pasta de cimento tende a se decompor em partículas finas e a se concentrar em frações abaixo de 0,15 mm (ULSEN et al, 2013). Assim sendo, quanto maior o número de estágios de cominuição a que o resíduo for submetido, maior é a liberação entre as fases, conseqüentemente, menor é o teor de pasta de cimento aderida à superfície da partícula (DE JUAN e GUTIERREZ, 2009; ULSEN et al, 2013), o que reflete em melhoria na qualidade do AR. No entanto, o número de estágios é limitado pelo custo do processo de produção e pela granulometria desejada do produto.

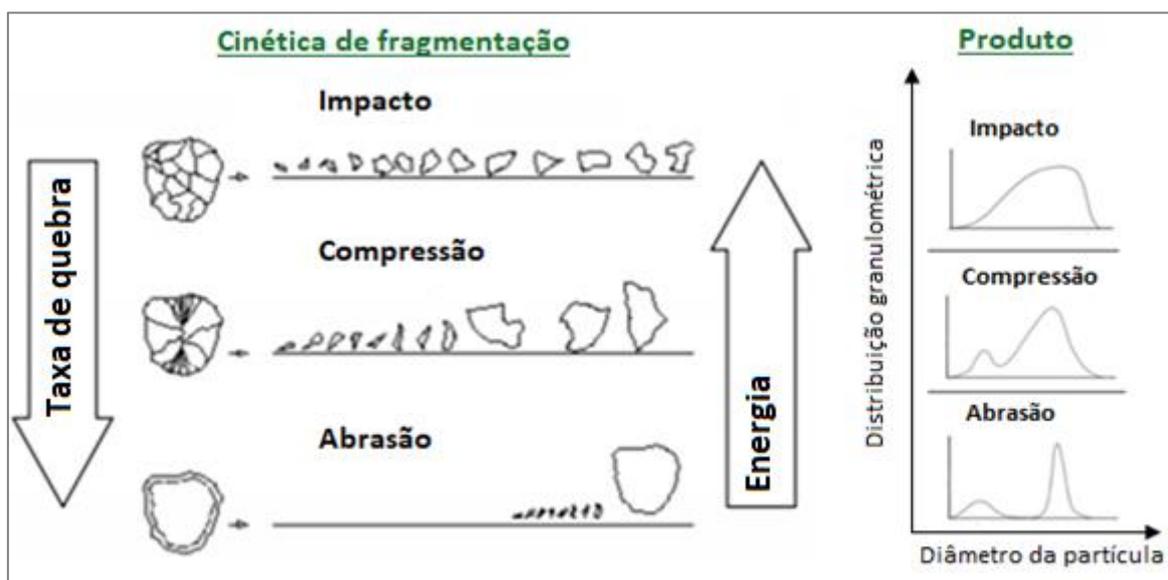
Neste contexto, ao escolher os mecanismos de cominuição a serem utilizados na reciclagem de RCD, sugere-se analisar as características do resíduo a ser beneficiado (AKBARNEZHAD et al, 2013), o produto desejável (WILSON, 1996) e a eficiência energética do processo (QUATTRONE e ANGULO e JOHN, 2014). Todavia, essas condições são raramente avaliadas em conjunto, de modo que a escolha do equipamento está prioritariamente relacionada ao custo de aquisição (normalmente de segunda-mão), capacidade de produção e facilidade de manutenção.

2.3.1 A influência dos diferentes mecanismos de cominuição nas propriedades do agregado reciclado

Segundo Wills e Napier-Munn (2006), nas operações de britagem predominam os mecanismos de compressão e impacto. No impacto, a partícula recebe uma alta força do equipamento e fragmenta-se, principalmente, por redistribuição de tensão; na fragmentação por compressão, a redução granulométrica ocorre tanto por redistribuição de tensão quanto por cisalhamento nos pontos de contato com o equipamento.

Além do impacto e compressão, Kelly e Spottiswood (1982) consideram a fragmentação por abrasão, e ressaltam que na prática mais de um mecanismo pode ocorrer simultaneamente. A Figura 2.4 exemplifica os mecanismos de cominuição por britagem que conduzem à fratura de uma partícula.

Figura 2.4 – Cinética de fragmentação que conduzem à fratura de uma partícula por britagem



Fonte: modificado de Kelly e Spottiswood (1982).

Ao se referir à reciclagem de resíduo de construção e demolição, não há um consenso em relação à influência da fragmentação por compressão e impacto sobre as propriedades dos AR.

Segundo Hansen (1986), o britador de mandíbulas tem baixa relação de redução e fragmenta uma parcela dos agregados naturais presentes no concreto, o

que resulta em um produto com distribuição granulométrica mais grossa, enquanto na britagem por impacto a fragmentação dos resíduos de argamassas e de agregados naturais ocorre uniformemente. Essa conclusão do autor não é confirmada por dados experimentais.

De acordo com Momber (2002), ao cominuir o RC em britador de mandíbulas, uma zona de ruptura é formada e está diretamente relacionada à granulometria do agregado natural presente no resíduo. Essa desagregação depende da resistência do resíduo à fragmentação que, por consequência, influencia na eficiência energética do processo, devido ao consumo de energia para fragmentar o RC ser maior que a necessária para britar os resíduos mistos ou de alvenaria.

Diversos autores concluem que a fragmentação no britador de mandíbulas ocorre nos limites entre partículas, o que permite alta relação de redução do tamanho do material e, portanto, gera AR com baixo teor de pasta de cimento e porcentagem de partículas finas consideráveis (FLEISCHER, 1996; LIMA, 1999; ETXEBERRIA et al, 2007; ACPA, 2009).

Por outro lado, segundo Gress et al (2009), o britador de mandíbulas, ante os britadores de impacto e cônico, tende a deixar maiores teores de pasta de cimento aderida nos AR; entretanto, os autores obtiveram essa conclusão sem apresentar resultados de caracterização que a fundamentem.

Pereira et al (2012) avaliaram a influência do britador de mandíbulas na qualidade do agregado miúdo reciclado. Os autores idealizaram que, quanto maior a relação de redução das partículas, maior seria a liberação da pasta de cimento. Entretanto, a metodologia não levou em consideração as características iniciais do resíduo a ser beneficiado tampouco as configurações do britador de mandíbulas, o que resultou em um processo de britagem com limitação na liberação da pasta de cimento.

Para Etxeberria et al (2007), o RC beneficiado em britador de impacto gera um produto com maior liberação de argamassa, porém a análise não demonstra dados comparativos com outros métodos de britagem.

Em estudo recente, Ulsen et al (2018) fizeram uma comparação entre os britadores de mandíbulas e de impacto utilizados como britagem secundária de RC de diferentes origens e resistências. O resultado foi um produto similar em relação ao teor de pasta de cimento, densidade, porosidade e distribuição de tamanho de partículas em ambas as britagens. Adicionalmente, os autores destacaram que a britagem em granulações menores e próxima à granulometria de liberação das fases poderia gerar resultados divergentes.

A Tabela 2.2 sintetiza os dados descritos em literatura sobre agregados reciclados produzidos por britadores de mandíbulas e de impacto.

Tabela 2.2 – Dados descritos em literatura sobre AR produzidos por britadores de mandíbulas e de impacto

Tipo de britador	Observação	Referência
Britador de mandíbulas	Produto com DG grossa	(HANSEN, 1986)
Britador de impacto	Produto com argamassa e agregado natural com mesma DG	(HANSEN, 1986)
Britador de mandíbulas	A liberação entre as fases depende da resistência do resíduo à fragmentação	(MOMBER, 2002)
Britador de mandíbulas	Alta relação de redução granulométrica, produto com baixo teor de pasta de cimento e geração expressiva de finos	(FLEISCHER, 1996; LIMA, 1999; ETXEBERRIA et al, 2007; ACPA, 2009)
Britador de mandíbulas	Tende a deixar maiores proporções de pasta de cimento aderida aos AR	(GRESS et al, 2009)
Britador de mandíbulas	Idealizam que quanto maior a RR, maior liberação, mas não puderam comprovar	(PEREIRA et al 2012)
Britador de mandíbulas	Produto com aspecto mais angular e superfície irregular comparado aos agregados naturais	(EVANGELISTA et al, 2015)
Britador de impacto	Produto com maior liberação de argamassa	(ETXEBERRIA et al, 2007)
Britador de mandíbulas versus de impacto	Produto similar em teor de pasta de cimento, densidade, porosidade e DG	(ULSEN et al, 2018)

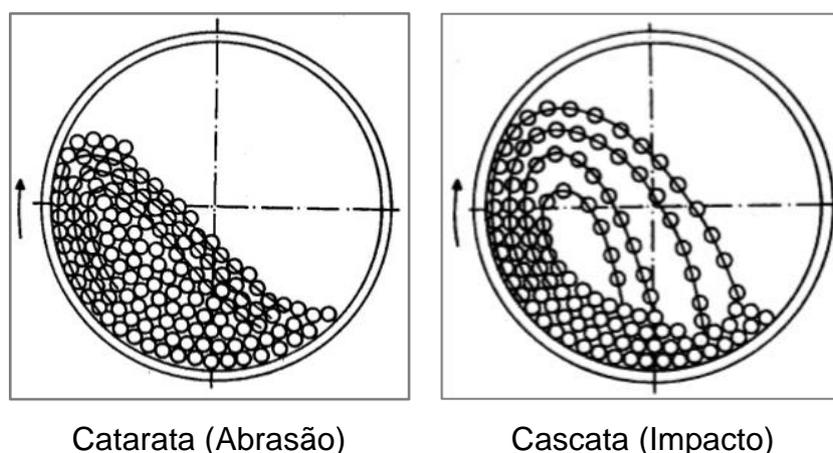
Obs: DG = distribuição granulométrica, AR = agregado reciclado, RR = relação de redução

Além disso, a otimização do método de britagem, denominado como “*smart crusher*”, tem sido investigada (FLOREA e NING e BROUWERS, 2013). O *smart crusher* é um equipamento que associa a fragmentação à compressão e abrasão com objetivo de produzir agregado reciclado de concreto (AMRC) com menor proporção de pasta de cimento ante os métodos de britagem convencionais.

Para elevar a qualidade do agregado reciclado, etapas subsequentes à britagem têm sido realizadas, como por exemplo a cominuição por moagem. Neste processo as partículas são reduzidas pela combinação de impacto, compressão e abrasão a um tamanho adequado à liberação da fase de interesse (FIGUEIRA e LUZ e LUIZ, 2010).

Na moagem por abrasão, a baixa velocidade de rotação do equipamento e o alto fator de enchimento fazem com que as bolas dentro do moinho deslizem sobre o material em um fenômeno superficial (NAPIER-MUNN, 1999), portanto, age na superfície da partícula. Na alta rotação do equipamento, a moagem ocorre por impacto, onde as bolas se movem perpendicularmente ao plano de contato e caem de forma rápida e em intensidade superior à resistência da partícula (BERALDO, 1987; NAPIER-MUNN, 1999). O movimento das bolas no moinho é ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Regime de operação do moinho



Fonte: Taggart (1945).

Durante o processo de moagem de RC, espera-se que a fração granulométrica do agregado permaneça intacta enquanto a pasta de cimento aderida à superfície da partícula seja seletivamente removida, em um mecanismo de polimento dos grãos, também conhecido como moagem seletiva (OGAWA e NAWA, 2012; DILBAS e ÇAKIR e ATIS, 2019).

A velocidade de rotação do moinho está relacionada à porcentagem da sua velocidade crítica (V_c), que pode ser calculada pela Equação 2.1, em rotação por

minuto, e Equação 2.2, em porcentagem (FIGUEIRA e LUZ e LUIZ, 2010). Geralmente, para um baixo valor de V_c (próximo a 40%) a moagem se encontra em um regime de abrasão, em contrapartida, para um alto valor (aproximadamente 90%) ocorrerá por impacto.

$$V_c(\text{rpm}) = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (2.1)$$

$$V_c(\%) = \frac{V_r}{V_c(\text{rpm})} \times 100 \quad (2.2)$$

em que:

V_c (rpm) = velocidade crítica do moinho em rotação por minuto (rpm);

D = diâmetro do moinho em metros (m);

V_c (%) = velocidade crítica em porcentagem;

V_r = velocidade de rotação (rpm).

Dilbas et al (2019) descrevem que o aumento da velocidade crítica do moinho de bolas associado à grandes quantidades de bolas no processo de moagem, reduzem a absorção de água do ARC e também eleva significativamente a geração de finos. Entrementes, a aplicação dos agregados reciclados para a fração areia e ultrafinos ainda não está claramente desenvolvida (ULSEN et al, 2018); portanto, a reciclagem de RC deve evitar a produção excessiva desses materiais até que novas aplicações sejam encontradas.

Kim et al (2018) afirmam que maiores proporções de bolas (em massa) do que de RC dentro do moinho, em ensaios de longo período de moagem, levam à obtenção de um agregado reciclado de boa qualidade; porém, o estudo não investigou o consumo de energia neste processo. Assim, há uma necessidade de investigação adicional sobre a eficiência da moagem, que de acordo com Taggart (1945) é determinada pela liberação do mineral de interesse (ou fase de interesse) associado ao custo requerido nesta operação.

2.3.2 Processos de cominuição para produção de agregado miúdo reciclado

Após a reciclagem de RC, uma parcela da pasta de cimento permanece aderida à superfície do agregado reciclado. Essa presença é responsável pelo aumento da porosidade do material, que, por sua vez, eleva sua absorção de água

(OMARY e GHORBEL e WARDEH, 2016). Todavia, essa particularidade pode ser melhor controlada em processos de cominuição (EVANGELISTA et al, 2015).

A Tabela 2.3 sumariza os dados da literatura referentes às rotas de processos para produção de AR juntamente com a origem do material, bem como a absorção de água do produto reciclado e a possível aplicação após a reciclagem.

Tabela 2.3 – Rotas de processos para produção de agregado miúdo reciclado

Rota de processo	Origem	IGE (mm)	A.A. (%)	Aplicação do AR	Referência
Britagem primária (B.n.i.) e peneiramento	Concreto	0-5	10,80	Concreto usinado, tubo de concreto, pedra de pavimentação e artefatos	(ÖZALP et al, 2016)
		5-12	9,00		
		12-22	7,90		
Britagem primária (B.n.i.) e classificação	Concreto	0-4	7,30-7,80	Concreto estrutural	(OMARY et al, 2016)
		4-10	5,40-6,40		
		10-20	5,60-6,20		
Britagem primária (B.M.) e classificação, para d>19mm: britagem secundária (B.C.) e terciária (B.C.), seguido por classificação e lavagem	Concreto	0,15-4,75	8,90	Concreto	(FAN et al, 2016)
Britagem primária (B.M.) e peneiramento, para d<50mm: britagem secundária (B.M.) e britagem terciária (B.R.), seguido por classificação e lavagem	Concreto	0,15-0,60	6,60		
Escalpe (d<4,8 mm), britagem primária (B.I.), separação magnética, britagem secundária (B.M.) e classificação	misto	0,15-3	12,00	Areia em geral	(ULSEN et al, 2013)
Escalpe (d<4,8 mm), britagem primária (B.I.), separação magnética, britagem secundária (B.M.), classificação, para d<19 mm: britagem terciária (VSI) e classificação (d>3 mm retorna para o VSI)	misto	0,15-3	7,00-9,00		
Pré-fragmentação (disjuntor de demolição) e classificação	Concreto	0,15- 9,52	5,98		
Britagem primária (B.M.) e classificação (d≥4,75 mm retorna para o B.M.)	Concreto	0,15-4,75	5,67	Bloco de concreto	(GOMES et al, 2015)
Britagem primária (B.M.), moagem (M.M.) e classificação (d≥1,18 mm retorna para o M.M.)	Concreto	0,15-1,18	3,51		
B.M., classificação, M.B. e granulador; em diferentes combinações	Concreto	0,15-5	3,39-6,02	Argamassa	(OGAWA e NAWA, 2012)

(Continua)

Tabela 2.3 – Rotas de processos para produção de agregado miúdo reciclado

					(Conclusão)
Rota de processo	Origem	IGE (mm)	A.A. (%)	Aplicação do AR	Referência
Britagem primária (B.M.) e peneiramento	Concreto laboratorial	0,074-1,19	13,10	Concreto estrutural	(EVANGELISTA e DE BRITO, 2007)
M.B. e tratamento ácido; em diferentes combinações	Concreto	0,15-5	2,30-5,11	Concreto classe 1	(KIM et al, 2018)
Britagem primária (B.n.i.) de d<20 mm, lavagem e britagem secundária (B.n.i.) até d<5 mm	Tijolo	< 5	14,75	Concreto	(KHATIB, 2005)
	Concreto	< 5	6,25		
Britagem primária (B.n.i.) e classificação, para d>4,76mm: britagem secundária (B.M.) e classificação (d>4,76 mm retorna para o B.M.)	Cerâmica	0-4,76	4,71	Argamassa	(MARTÍNEZ et al, 2013)
	Misto	0-4,76	7,45		
	Concreto	0-4,76	6,27		
Triagem, trommel, britagem primária (B.n.i.), moagem (M.n.i.) e classificação para remoção de d>4 mm e d<0,063 mm	Cerâmica	0,063-4	7,48	Argamassa de alvenaria	(MARTÍNEZ et al, 2016)
	Misto	0,063-4	6,88		
	Concreto	0,063-4	6,12		
Triagem, moinho de martelo e classificação (d<1,18mm)	Misto	0,075-1,2	4,50-7,60	Argamassa	(MIRANDA et al, 2013)
Britagem (B.n.i.) e classificação	Concreto	0-5	5,67	Concreto	(ZHU e WANG e FENG, 2011)
Britagem primária (B.M.) e peneiramento	Concreto laboratorial	< 4	10,90	Concreto	(PEREIRA et al, 2012)

Obs: IGE = intervalo granulométrico estudado, A.A. = absorção de água, d=diâmetro da partícula, B.M. = britador de mandíbulas, B.I. = britador de impacto, B.C. = britador cônico, B.R.= britador de rolos, B.n.i. = britador não informado, M.B. = moinho de bolas, M.n.i. = moinho não informado, AR = agregado reciclado.

Özalp et al (2016) britaram e classificaram RC com vista à produção de AR em diferentes faixas granulométricas. Os autores analisaram as propriedades físicas do produto por intervalos granulométricos, e o resultado foi um produto com menor absorção de água para frações superior a 5 mm ao se contrapor com a granulação inferior a 5 mm; sendo que alta absorção de água em AR se mostra prejudicial à resistência dos concretos. Omary et al (2016) também observaram maior absorção de água em fração granulométrica inferior a 4 mm.

Em contrapartida, para Fan et al (2016) a redução granulométrica do RC para produção de AMR diminuiu a absorção de água do produto. Esse fato está possivelmente associado à maior probabilidade de liberação entre o agregado e a pasta de cimento conforme a redução do tamanho do material, e à separação entre a fração miúda e ultrafina após a fragmentação. Os autores afirmaram que a qualidade do agregado reciclado está significativamente associada ao processo de cominuição utilizado na reciclagem.

Rodrigues et al (2013) compararam diferentes usinas de reciclagem, e foi observado que, em termos de tratamento mineral, todas as rotas de processos avaliadas eram diferentes entre si, sendo as principais diferenças: os mecanismos de fragmentação utilizados e a existência de métodos de classificação do produto antes e após a cominuição para separação das partículas finas e/ou ultrafinas.

Na fração granulométrica ultrafina há elevada concentração de pasta de cimento e reduzido teor de agregados naturais, por outro lado, frações de maiores granulações apresentam quantidades consideráveis de agregados naturais ausentes de pasta de cimento (EVANGELISTA et al, 2015). Portanto, separar as partículas ultrafina enriquecidas de pasta de cimento das demais granulometrias pode elevar a qualidade do agregado reciclado.

Ulsen et al (2013) produziram AMR por dois e três estágios de britagem, sendo a britagem terciária em equipamento de impacto vertical (VSI - *Vertical Shaft Impactor*) com diferentes velocidades de rotação. O resultado apontou para uma produção de AMR com menor porosidade e com partículas de maior esfericidade em relação à originalmente presente no RCD ou gerada pelo produto da britagem

secundária. Adicionalmente, a diferença entre as velocidades de rotação avaliadas apresentou uma sutil influência sobre as propriedades dos agregados reciclados.

Gomes et al (2015) analisaram diferentes rotas de processos e, segundo os autores, o britador de mandíbulas reduz 5% da absorção de água ante o tratamento mineral com apenas pré-fragmentação e classificação; ao acrescentar a moagem no beneficiamento, a redução foi ainda mais significativa. No entanto, essa comparação ocorreu entre faixas granulométricas distintas.

Ogawa e Nawa (2012) estudaram agregados miúdos reciclados produzidos por três métodos de cominuição em diferentes combinações. Os autores afirmaram que a repetição de cada etapa do tratamento eleva a densidade do agregado reciclado e reduz a absorção de água. Além disso, a morfologia das partículas ficou mais regular e arredondada após a moagem em moinho de bolas em comparação com os demais equipamentos; deste modo, os autores concluíram que a qualidade do AMR foi elevada após o beneficiamento em moinho de bolas.

Martínez et al (2013) afirmam que a aplicação de AR em argamassas não é tão amplamente discutida em literatura quanto sua aplicação em concreto. Deste modo, os autores produziram AR oriundos de resíduos cerâmico, concreto e misto a serem utilizados como argamassas de alvenaria. As propriedades das argamassas fabricadas com os três produtos reciclados apresentaram melhores desempenhos do que àquelas fabricada com agregados naturais. Os autores justificaram que essa melhoria ocorreu devido à distribuição granulométrica mais uniforme dos AR e à baixa qualidade dos agregados naturais atualmente disponível em Havana.

Posteriormente, Martínez et al (2016) alteraram a rota de processamento dos resíduos e novamente investigaram a viabilidade de incorporação dos produtos em argamassas de alvenaria. Os autores concluíram que AR com absorção de água entre 5% e 10% são aceitáveis para uso em argamassa reciclada.

Segundo Martínez et al (2013), a formulação de argamassas de alvenaria necessita de expressiva quantidade de areia natural, porém, sua função não é para fins estruturais, bem como não estão sujeitas à presença de umidade. Deste modo,

o uso de AMR como substituto ao natural tem se mostrado plausível (HAWLITSCHKE, 2014).

A combinação entre tratamentos térmicos e mecânicos tem sido relatada como um método alternativo para produção de AMR de alta qualidade (MULDER e DE JONG e FEENSTRA, 2007; KIM e CHO e AHN, 2012; SUI e MUELLER, 2012). Para isso, os resíduos de concreto são submetidos a altas temperaturas com intuito de reduzir a resistência à fragmentação e facilitar a liberação da pasta de cimento. Entretanto, tem-se demonstrado ser um processo ineficiente com base no consumo de energia e nas emissões de CO₂ (SHIMA et al, 2005; QUATTRONE e ANGULO e JOHN, 2014).

Utilizar impulsos de descargas elétricas (UENISHI et al, 2014) e impulsos sônicos (LINSS e MUELLER, 2004) ao invés de processamentos mecânicos também foram testados, porém, ainda não há resultados relevantes que apoiem tais tecnologias.

2.4 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS RECICLADOS

A caracterização aplicada aos agregados reciclados são ferramentas tecnológicas que permitem avaliar suas características com perspectiva de uso em construção civil, dando suporte às atividades de processamento de modo a controlar a qualidade da produção. Neste caso, os parâmetros mais relevantes passam a ser: distribuição de tamanho e morfologia das partículas, composição química e mineralógica, absorção de água e porosidade. Ao se controlar essas propriedades, tem-se a estimativa das especificações do produto.

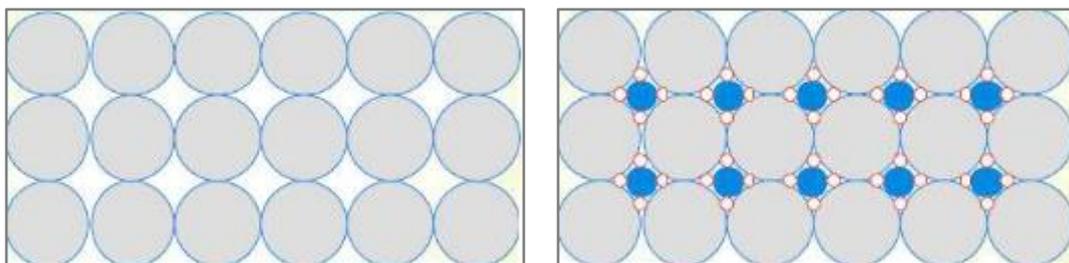
2.4.1 Distribuição de tamanho das partículas

Anterior à seleção do método de cominuição, faz-se necessário definir a eficiência desejável da separação das fases constituintes do resíduo a ser processado. Para isso, deve-se realizar uma análise textural da amostra e pré-determinar a fração granulométrica considerada seletiva. O não cumprimento dessa avaliação é a razão pela qual o teor da pasta de cimento no agregado reciclado, relatado em literatura, apresenta variação e é de difícil comparação (LI, 2008; AKBARNEZHAD e ONG, 2013; BRAYMAND et al, 2017).

Após o processamento do RCD, a distribuição de tamanho das partículas possibilita analisar as proporções granulométricas em massa do produto, portanto, quanto do RCD processado se concentra na granulação desejável de acordo com a aplicação.

Adicionalmente, segundo Pileggi (2001), ao combinar grãos de tamanhos variados tem-se uma redução de vazios na amostra, em que partículas menores preenche os vazios entre as partículas maiores, como demonstra a Figura 2.6. Esse efeito faz com que a distribuição de tamanho seja uma das propriedades mais relevantes em agregados devido à interferência na compacidade do concreto (RODRIGUES et al, 2013) e à influência na demanda de água dos materiais cimentícios.

Figura 2.6 – Redução de vazio na amostra ao combinar diferentes tamanhos de partículas



Fonte: Pileggi (2001).

Assim, para caracterizar a distribuição granulométrica, o método selecionado deve estar de acordo com o tamanho das partículas a ser analisada, a possibilidade de operação em meio aquoso ou a seco e se há intenção de fracionar a amostra. Dentre as técnicas utilizadas, o peneiramento é o mais antigo (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006) e usual na indústria mineral (SAMPAIO e FRANÇA e BRAGA, 2007). Entretanto, estudos têm avaliado sua automatização mediante análise de imagens dinâmica, que além da distribuição granulométrica também permite determinar a morfologia das partículas simultaneamente.

2.4.2 Morfologia das partículas

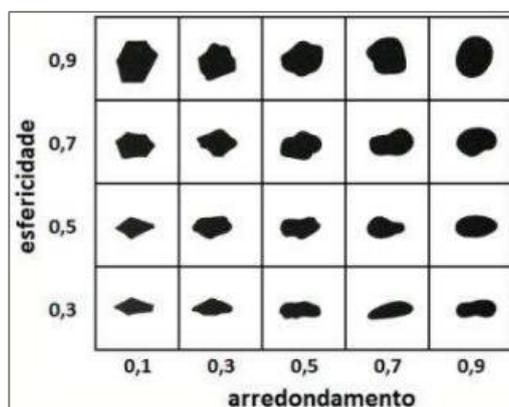
As técnicas de caracterização morfológica avaliam a forma e a textura das partículas. A textura está associada à superfície do agregado e pode ser classificada

como lisa ou áspera que, por sua vez, depende da dureza, do tamanho e da porosidade superficial da partícula. A forma se refere às características geométricas sendo essas arredondada, angulosa, alongada ou achatada (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Na reciclagem do RCD, a cominuição pode alterar a morfologia das partículas. Os agregados produzidos por mecanismos de impacto tendem a ser cúbicos (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982), a fragmentação à compressão pode produzir partículas lamelares, e por abrasão a um aspecto arredondado, devido aos desgastes e redução dos vértices e arestas na superfície da partícula (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Segundo Mehta e Monteiro (2014), as partículas alongadas e lamelares devem ser evitadas ou limitadas a no máximo 15%, em massa, no agregado.

No passado, a morfologia das partículas era avaliada de maneira qualitativa mediante a comparação visual das partículas com um gabarito preestabelecido, como o exibido na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Gabarito comparativo para análise visual morfológica das partículas



Fonte: Krumbein e Sloss (1956).

No Brasil, a norma NBR 7809 especifica o método para determinar a morfologia dos agregados graúdos, que se baseia na medição do maior e do menor diâmetro de cada partícula por meio de um paquímetro (ABNT, 2008). Para os agregados miúdos, podem-se citar análises de forma estática normatizada pela ISO 13322-1/04 (ISO, 2004), na qual as partículas são dispostas sobre uma superfície plana, suportes ou lâminas e analisadas por microscopia óptica ou eletrônica de

varredura, porém, esses métodos são considerados morosos, imprecisos e possuem baixa reprodutibilidade e representatividade, uma vez que dependem da experiência do operador, além de um elevado tempo de execução (AL-ROUSAN et al, 2007; ULSEN, 2011).

Com a evolução tecnológica, os procedimentos de análise morfológica passaram por melhorias e atualmente possibilitam a caracterização dos parâmetros geométricos por meio da análise de imagens dinâmica, com dados sendo compilados de forma automática e emissão de resultados com maior confiabilidade e reprodutibilidade (ISO, 2006). Os equipamentos QICPIC (Sympatec), Camsizer (Retsch Technology), CPA (Haver & Boecker) e RapidVue (Beckman Coulter) são alguns exemplos destes modernos mecanismos.

O Camsizer é um equipamento óptico-eletrônico que correlaciona o tamanho e a morfologia das partículas em 2D, sendo capaz de analisar até milhões de partículas em poucos minutos, com resultados robustos e estatisticamente representativos. Atualmente, dois modelos são comercializados o Camsizer-L e o Camsizer-XT; em ambos os equipamentos o material passa por uma área onde existe uma fonte de luz LED e duas câmeras que captam simultaneamente as imagens que são processadas por um software de análise de imagens dinâmica.

No Camsizer-L as análises são efetuadas com o material seco em queda livre e tem um limite analítico de 30 μm a 30 mm; enquanto no Camsizer-XT, o sistema opera tanto com o material seco quanto em meio aquoso (<0,6 mm), e possui um alcance entre 1 μm e 8 mm.

Para determinar a distribuição de tamanho das partículas, o equipamento realiza uma análise da partícula por projeção em 2D e o resultado pode ser apresentado em: diâmetro de uma esfera com área projetada equivalente (x_{area}), diâmetro máximo de Ferret (Fe_{max}) - maior distância entre duas retas paralelas que tangenciam a partícula -, e diâmetro mínimo (x_{min}), o menor valor dentre os diâmetros máximos da partícula, ao considerar distintas orientações de medida; sendo o valor do último parâmetro próximo ao do peneiramento.

Em paralelo ao ensaio de distribuição de tamanho da partícula, o software avalia a forma das partículas. Há diversos parâmetros que podem ser analisados, porém os usuais na Engenharia Mineral são: esfericidade (SPHT: *Sphericity* - Equação 2.3) e a razão de aspecto das partículas (b/l : *breadth/length* – Eq. 2.4):

$$SPHT = \frac{4\pi(\text{área da partícula})}{(\text{perímetro da partícula})^2} \quad (2.3)$$

$$b/l = \frac{x_{\min}}{Fe_{\max}} \quad (2.4)$$

em que:

SPHT = esfericidade da partícula;

b/l = razão de aspecto da partícula;

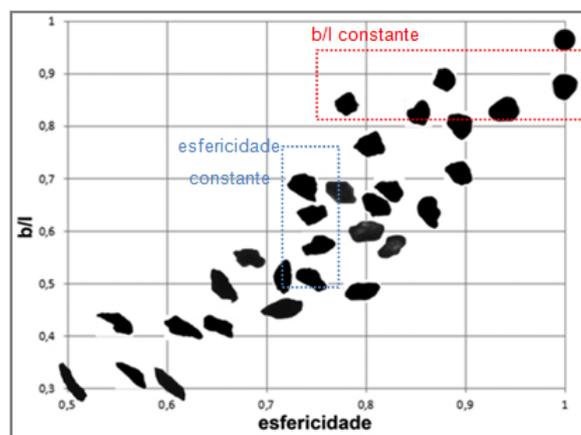
x_{\min} = largura da partícula;

Fe_{\max} = comprimento da partícula.

A razão de aspecto refere-se à razão entre o menor e o maior diâmetro das partículas, com valores entre 0 e 1; dessa forma, quanto mais próximo de 0, mais alongada será a partícula. Já a esfericidade considera a irregularidade do seu perímetro projetado, isto é, o arredondamento superficial dos grãos, sendo que quanto mais próximo de 1, mais regular será a superfície da partícula.

Sutis variações, entre 0 e 1, alteram substancialmente a morfologia da partícula. A Figura 2.8 ilustra a correlação da esfericidade (SPHT) com a razão de aspecto (b/l) de diferentes areias comercializadas no estado de São Paulo.

Figura 2.8 - Correlação entre a razão de aspecto (b/l) e a esfericidade de areias comerciais (medidas do equipamento CAMSIZER)



Fonte: Hawlitschek (2014).

Os agregados reciclados tendem a uma forma mais angular e superfície irregular se comparado aos agregados naturais (EVANGELISTA et al, 2015). Portanto, selecionar e configurar os mecanismos de cominuição com intuito de produzir agregado reciclado com morfologia adequadas à aplicação de maior exigência técnica possibilitará ampliar sua utilização.

2.4.3 Composição química e mineralógica

O RCD é heterogêneo (ANGULO, 2000), o que dificulta sua gestão, reciclagem e controle de qualidade do produto reciclado. Para caracterizar os minerais, técnicas analíticas são comumente conjugadas (SANT'AGOSTINO e KAHN, 1997); neste caso, as análises química e mineralógica auxiliam na avaliação da qualidade para uma destinação confiável do agregado reciclado (LIMBACHIYA e MARROCCHINO e KOULOURIS, 2007; ANGULO et al, 2009).

Para quantificar a composição química da amostra, as técnicas usualmente aplicadas na mineração são: espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), espectrometria de absorção atômica (AAS) e espectrometria de emissão por plasma de acoplamento indutivo (ICP-OES) (EWING, 1972; DUTRA e GOMES, 1984; WILLIAMS, 1996); para um maior entendimento, uma boa explicação dos métodos instrumentais é apresentada em Dutra e Gomes (1984).

A caracterização mineralógica proporciona a quantificação dos minerais, portanto, propicia a determinação da composição e o grau de liberação das fases de interesse (SANT'AGOSTINO e KAHN, 1997), sendo as técnicas mineralógicas condizentes com a composição química: difratometria de raios X (DRX) (CULLITY, 1978; FORMOSO, 1984), microscopia óptica (PETRUK, 2000) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) (GOLDSTEIN et al, 1992).

As técnicas supracitadas foram investigadas por diversos autores de modo a determinar as principais fases constituintes do agregado reciclado, os resultados encontrado foram: quartzo (associado principalmente à sílica – SiO_2), feldspato (Na_2O e K_2O), calcita (CaO - relacionado à pasta de cimento e agregado calcário), micas, sulfatos e os óxidos (geralmente de ferro e alumínio – Fe_2O_3 e Al_2O_3 ,

respectivamente) (BIANCHINI et al, 2005; LIMBACHIYA e MARROCCHINO e KOULOOURIS, 2007; ANGULO et al, 2009; ULSEN, 2011).

Além disso, recomenda-se controlar a presença de álcalis (associado ao feldspato) presente no cimento, pelo fato de reagir com algumas fases minerais do agregado natural e, conseqüentemente, provocar fissuras na massa endurecida (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Portanto, se os teores de álcalis forem superiores a 1%, autores aconselham que seja averiguada a solubilidade desse composto (QUARCIONI e CHOTOLI e ALEIXO, 2003).

2.4.4 Teor da pasta de cimento

Para os agregados graúdos e miúdos ausentes de agregados calcários, dados da literatura indicam que a quantificação da pasta de cimento pode ser determinada por, pelo menos, dois procedimentos: por meio da lixiviação por solução de ácido clorídrico (HCl) e pela soma dos teores de óxido de cálcio com a perda ao fogo.

Na lixiviação ácida, o agregado reciclado reage com uma solução de HCl em que parte do material é solúvel (pasta de cimento) e parte insolúvel (como as rochas, cerâmicas, argilominerais e micas) (GRIM, 1953; NISHBAYASHI e YAMURA, 1988; YAGISHITA e SANO e YAMADA, 1994; STEEN e BORG, 2002; QUARCIONI e CINCOTTO, 2006; BRAYMAND et al, 2017). Esse ataque ácido é realizado a uma concentração de 33% de HCl, conforme descrito por Quarcioni e Cincotto (2006). Adicionalmente, autores afirmaram que a quantificação da pasta de cimento também pode ser realizada pela soma dos teores de óxido de cálcio com a perda ao fogo a 1.050°C (ANGULO, 2005; ANGULO et al, 2009).

Ambos os procedimentos são restritivos quando há agregados calcários na amostra. Na lixiviação, pelo fato do carbonato da rocha (fase de interesse) e o cálcio da pasta de cimento (ganga) serem dissolvidos na presença de HCl, e na composição química, devido ao teor de óxido de cálcio e perda ao fogo estarem relacionados tanto à pasta de cimento como ao agregado calcário. Portanto, as técnicas superestimam o conteúdo de pasta de cimento existente quando o material contém agregado e/ou *filler* calcário.

Assim, normativas estão sendo desenvolvidas e validadas com intuito de se obterem resultados com maior confiabilidade na presença de carbonatos (MACEDO e ULSEN e MUELLER, 2019).

2.4.5 Absorção de água

Os agregados reciclados apresentam porosidade, devido às características de porosidade da pasta de cimento, que, por sua vez, torna-se a propriedade que mais os diferenciam dos agregados naturais (HANSEN, 1986; KOBAYASHI e KAWANO, 1988; MEHTA e MONTEIRO, 1994; LAMOND et al, 2002; CHEN e YEN e CHEN, 2003; YACOU e DJERBI e FEN-CHONG, 2018). Deste modo, o parâmetro de absorção de água tem sido amplamente discutido em literatura.

A absorção de água avalia as condições de umidade em uma partícula, sendo que maiores absorção de água significa alta quantidade de poros acessíveis em uma partícula. Para quantificar essa propriedade em uma amostra, deve-se mensurar a superfície saturada seca (SSS) do material, condição em que os poros permeáveis estão saturados e não há película de água em sua superfície (MEHTA e MONTEIRO, 2014; YACOUB e DJERBI e FEN-CHONG, 2018); a Figura 2.9 ilustra tais condições.

Figura 2.9 – Condição de umidade de agregados porosos



Fonte: Ulsen (2011).

De acordo com a norma brasileira NM30 (ABNT, 2001), o procedimento para determinação da absorção de água leva a quantificação entre a diferença da massa da amostra na condição de SSS e seca em estufa, ou seja, mede a quantidade de água nos poros acessíveis à água (ou abertos). A Tabela 2.4 sumariza a absorção

de água aceitável para as aplicações de agregado reciclado de resíduos de concreto.

Tabela 2.4 – Absorção de água para aplicação do agregado reciclado para diferentes normas

Região	Norma	A.A. (%)	Aplicação do AR
Turquia	TS 436 EN 1340, 2005	≤ 6	Concreto
Espanha	EHE-08, 2010	7	Concreto estrutural
Coreia	KS F 2504 - Kim et al, 2018	< 5	Concreto Classe I
Espanha (Madri)	Proyecto Gear, 2012	10	Concreto estrutural
Recomendação mundial	RILEM, 1994	10	Concreto até 50 Mpa

Obs: AR = agregado reciclado, A.A. = absorção de água.

Na perspectiva do processamento mineral, quanto maior a liberação entre o agregado e a pasta de cimento, maior é a quantidade de agregado reciclado livre de porosidade advinda da pasta de cimento e, por conseguinte, menor a absorção de água (GOMEZ-SOBERON, 2002; POON e SHUI e LAM, 2004). Assim, ao se associar a absorção de água com o processamento de resíduos, tem-se a estimativa das especificações do produto e indicações sobre o seu possível uso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

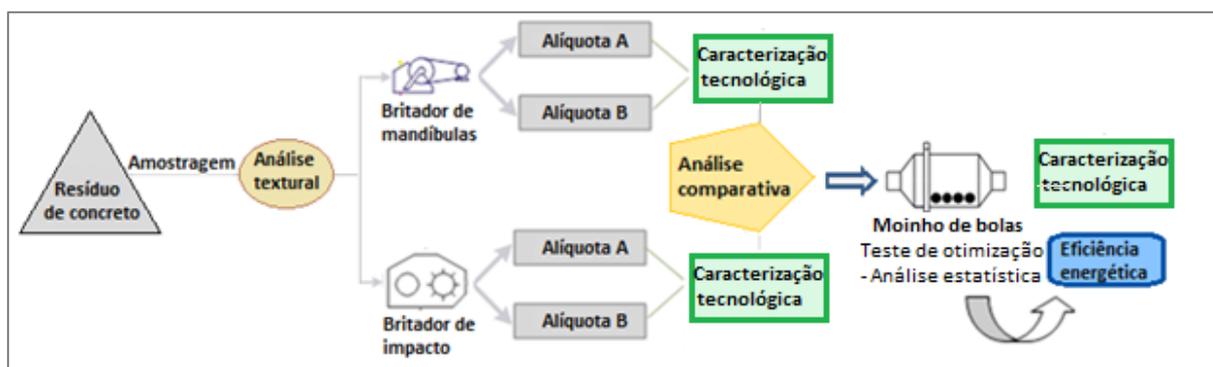
3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi desenvolvido em quatro etapas principais:

- 1) Amostragem e preparação da amostra inicial;
- 2) Avaliação comparativa dos mecanismos de britagem;
- 3) Moagem de baixa energia para remoção da pasta de cimento superficial;
- 4) Caracterização das propriedades do agregado miúdo reciclado de concreto.

O fluxograma esquemático das atividades é sumarizado na Figura 3.1 e detalhado nos subitens deste capítulo.

Figura 3.1 - Fluxograma do procedimento experimental



3.2 AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A amostra de resíduos de concreto (RC) utilizada no presente trabalho é oriunda de um aterro de materiais inertes da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). O RC depositado no aterro foi amostrado² de forma aleatória pela equipe técnica local e transportado para o departamento de Engenharia Mineral da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para estudos laboratoriais.

A Figura 3.2 retrata o material estudado, de granulometria inferior a 10 cm e de aproximadamente uma tonelada em massa. A fim de minimizar a variabilidade

² A amostragem não teve a intenção de coletar resíduos representativos do aterro tampouco da cidade; o objetivo foi coletar um resíduo de concreto isento de contaminantes orgânicos para os estudos de cominuição.

composicional, foi realizada a homogeneização do material em pilha alongada com toda a amostra coletada (Figura 3.3), conforme as melhores práticas laboratoriais para obtenção de alíquotas representativas (PETERSEN e MINKKINEN e ESBENSEN, 2005).

Figura 3.2 - Amostra de resíduo de concreto estudada composta por materiais pétreos e pasta de cimento porosa na superfície das partículas



Fragmento de rocha



Partícula recoberta por pasta de cimento endurecida

Figura 3.3 - Pilha de homogeneização alongada com toda amostra coletada

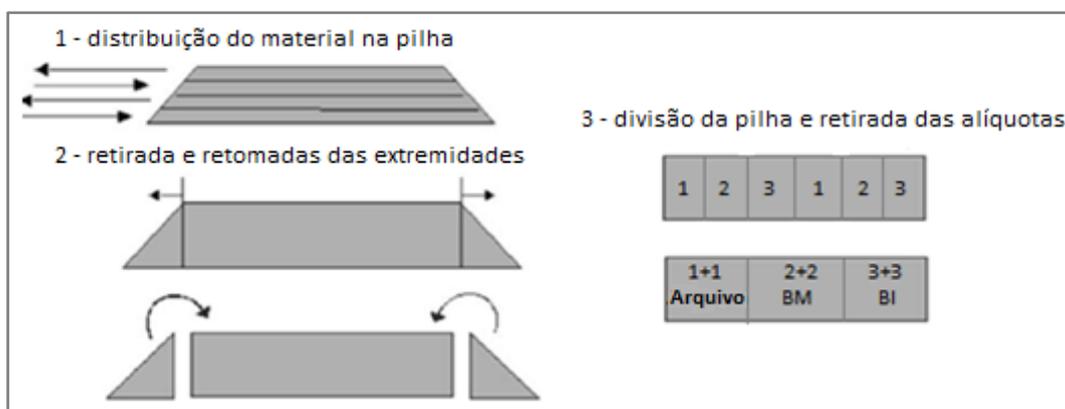


A confecção da pilha alongada ocorreu por distribuição de todo o material em movimentos de vai-e-vem sobre uma superfície plana e livre de contaminação. Ao

final da distribuição, as extremidades da pilha (local de maior heterogeneidade) foram retiradas, retomadas e redistribuídas, tal como exemplificado na Figura 3.4. Assim, para minimizar a heterogeneidade, a pilha foi dividida em seis partes iguais, sendo as partes opostas entre si novamente agrupadas, compondo ao final três alíquotas:

- (1+1 arquivo) – arquivada como contraparte da amostra inicial;
- (2+2 BM) – direcionada para a britagem em britador de mandíbulas;
- (3+3 BI) – direcionada para britagem em britador de impacto.

Figura 3.4 - Procedimento para homogeneização da amostra

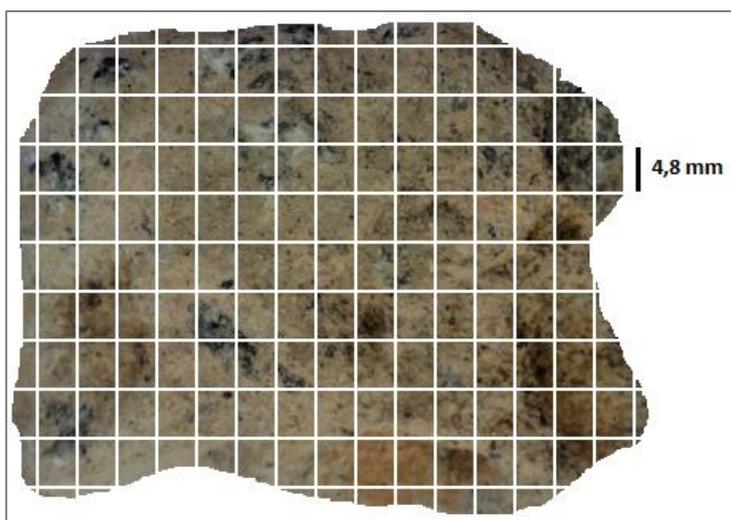


Fonte: adaptado de notas de aula de Kahn, H.

3.3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS MECANISMOS DE BRITAGEM

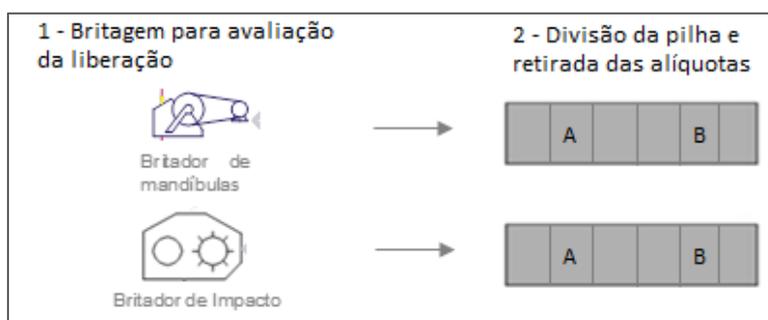
Para uma avaliação comparativa da influência dos mecanismos de britagem na liberação das fases constituintes da amostra, inicialmente foi realizada uma análise textural para verificação do tamanho dos grãos, de modo a se obter uma primeira estimativa da granulação de liberação. Assim, fragmentos de rocha foram observados ao microscópio estereoscópico e definiu-se que a granulação inicial de cominuição seria de 4,8 mm, como apresenta a Figura 3.5.

Figura 3.5 - Análise textural da amostra



O britador de mandíbulas de um eixo excêntrico e o britador de impacto com um eixo horizontal foram configurados de acordo com o resultado da análise textural da amostra; deste modo, adotou-se que 80% em massa do produto britado seria passante em 4,8 mm ($P_{80} = 4,8$ mm). Na sequência, o produto de cada britador foi disposto em uma pilha alongada e amostrado em duplicata, em que alíquotas de lados opostos foram denominados como A e B, como exemplificado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Britagem de resíduo de concreto e procedimento para preparação da amostra



As alíquotas A e B, de ambos britadores, passaram pela mesma sequência de caracterização a fim de verificar o procedimento de homogeneização. As amostras de cada processo de britagem foram analisadas de forma comparativa para avaliação das propriedades do produto.

A análise comparativa entre os produtos advindo de diferentes britadores foi regida em concordância com os conceitos estatísticos baseado na hipótese nula, tendo em vista a avaliação da similaridade entre as propriedades do produto de cada

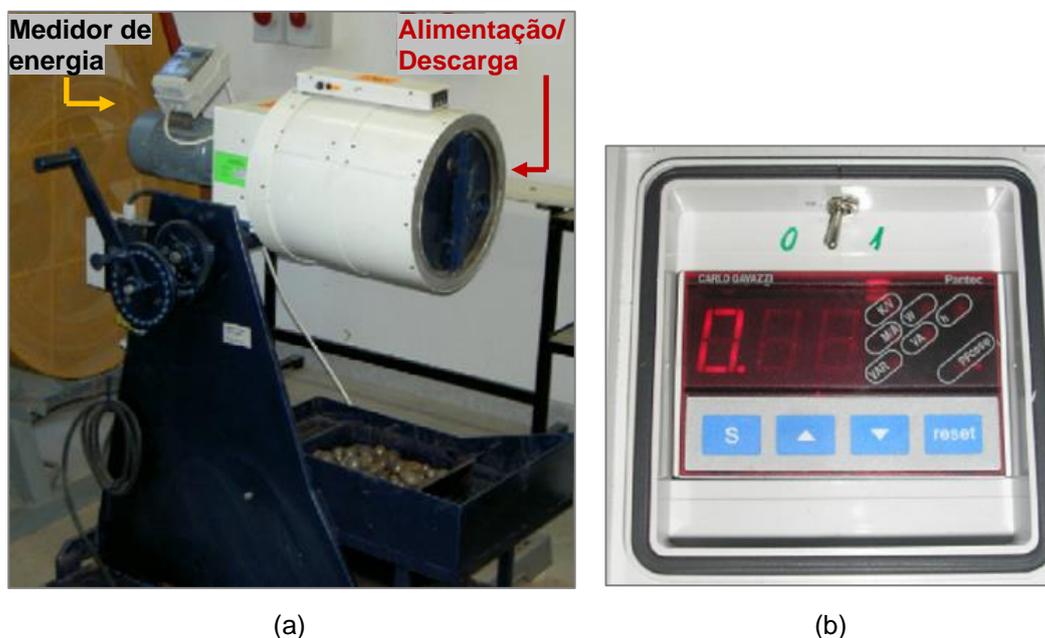
britador. O teste de hipótese foi realizado por “distribuição T de Student” em um nível de confiança equivalente a 95%.

3.4 MOAGEM DE BAIXA ENERGIA PARA REMOÇÃO DA PASTA DE CIMENTO SUPERFICIAL

Após a avaliação comparativa do efeito da britagem na liberação das fases constituintes do RC, os AR obtidos foram homogeneizados em uma pilha alongada (Figura 3.4), separado em alíquotas de 5 kg e transportado para o departamento de Engenharia Ambiental da Universidade de Miskolc (Miskolc, Hungria), onde foram realizados os estudos de moagem de baixa energia em moinho de bolas³.

Para se obter a melhor condição de um moinho de bolas de Bond (Figura 3.7 (a)), com intuito de operar de forma seletiva - remover a pasta de cimento aderida à superfície do agregado em um baixo consumo de energia no processo -, alguns parâmetros do equipamento foram pré-fixados, como descrito na Tabela 3.1, enquanto as condições avaliadas, conforme apresentada na Tabela 3.2, foram testadas em duplicata para uma maior precisão dos resultados.

Figura 3.7 – Medidor de energia acoplado ao moinho de bolas (a) e painel do medidor de energia (b)



³ Estudos realizados no período do mestrado sanduíche (de novembro/2018 a julho/2019).

Tabela 3.1 - Condições fixas dos ensaios de moagem

Condições	Características
Alimentação	F ₉₅ = 4,8 mm
Circuito de moagem	Batelada
Volume do moinho (m ³)	0,0212
Vazio da carga (%)	40
Densidade real do RC (g/cm ³)	2,39 ± 0,004
Densidade aparente do RC (g/cm ³)	1,53 ± 0,016

Obs: RC = resíduo de concreto, densidade⁴ = real foi determinada por picnometria de água, e a aparente por medida do volume da amostra e sua pesagem.

Tabela 3.2 - Variáveis testadas do moinho de bolas para moagem seletiva

Variáveis	Teste											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Velocidade crítica (%)	40	50	60	70	80	*	*	*	*	*	*	*
Tempo de moagem (min)	30	30	30	30	30	15	60	*	*	*	*	*
Diâmetro da bola (mm)	15	15	15	15	15	15	15	25	35	*	*	*
Enchimento, J (%)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Massa da amostra (kg)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1

* os espaços são preenchidos de acordo com a melhor performance no processo.

Os processos de moagem foram executados a seco, portanto, sem adição de água, e em ensaios de bateladas, em que todo o material é alimentado diretamente no moinho, sendo a moagem realizada em apenas um estágio; ao final do período estabelecido, o agregado reciclado foi retirado pela descarga do equipamento (Figura 3.7 (a)).

O moinho de bolas dispõe de um medidor automático de energia elétrica em quilowatts-hora acoplado no circuito de alimentação do motor, como pode ser observado na Figura 3.7 (a) e o seu painel pela Figura 3.7 (b). Ao acionar o moinho, o medidor armazena, a cada um minuto as leituras de: i) potência ativa - potência que efetivamente realiza trabalho, ii) potência reativa - potência usada para criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas, consumida pelo motor no processo de moagem.

⁴ Os ensaios de densidade foram realizados conforme as práticas laboratoriais de Barbato e Sampaio (2007).

A demanda por energia no processo de moagem não é totalmente utilizada para a fragmentação das partículas, devido às variáveis influenciarem no consumo de energia no moinho de bolas (SAMPAIO e FRANÇA e BRAGA, 2007), dentre as quais as estudadas nesta dissertação são:

- (i) Velocidade de operação do moinho: a velocidade de rotação do moinho está relacionada à sua velocidade crítica em rotação por minuto (rpm) e em porcentagem (%), calculada a partir da Equação 2.1 e 2.2 e replicada com os dados desta pesquisa como apresenta a Equação 3.1 e 3.2. Caso a condição de operação ultrapasse a sua velocidade crítica (V_c (rpm)), as bolas são centrifugadas para a carcaça do equipamento, o que ocasiona em uma redução de energia aplicada ao processo de fragmentação do material. Portanto, a otimização da velocidade de operação permite a maximização da capacidade de produção do moinho. Usualmente, os moinhos são operados em velocidades de 50% a 80% da sua velocidade crítica. O presente estudo avaliou as condições de velocidades críticas percentual de 40% a 80%, conforme detalha a Tabela 3.3.

$$V_c(\text{rpm}) = \frac{42,3}{\sqrt{0,3}} = 77,23 \text{ rpm} \quad (3.1)$$

$$V_r(\text{rpm}) = V_c(\%) * 77,23 (\text{rpm}) \quad (3.2)$$

Tabela 3.3 – Frequência do equipamento em hertz (Hz), velocidade de rotação do moinho em rotação por minuto (V_c rpm) e velocidade crítica em porcentagem (V_c %)

Frequência (Hz)	V_c (%)	V_r (rpm)
19,90	40	30,89
24,85	50	38,61
29,80	60	46,34
34,70	70	54,06
39,60	80	61,78

Para ajustar a velocidade do moinho, a partir dos valores de frequência (Tabela 3.3), foi utilizado um inversor Omron Sysdrive 3G3MV, como ilustra a Figura 3.8.

Figura 3.8 – Inversor Omron Sysdrive 3G3MV



O inversor Omron Sysdrive 3G3MV é um dispositivo capaz de acionar o motor do moinho e variar o fornecimento de frequência e tensão do equipamento, com o objetivo de controlar a sua velocidade e potência consumida.

- (ii) Tempo de moagem: para testes laboratoriais, aconselha-se a realização de ensaios com os seguintes tempos de moagem: 5, 10, 15, 20, 25, 30 minutos, ou mais, dependendo, sobretudo, da resposta do material às condições de moagem. Em uma simulação dos testes (pré-teste) avaliou-se os tempos de 5 e 10 minutos, entretanto, em virtude dos resultados obtidos, optou-se por utilizar os tempos de 15, 30 e 60 minutos, os quais foram controlados por cronômetro;
- (iii) Diâmetro da bola (corpo moedor): é uma das principais componentes que afeta a eficiência e a capacidade do moinho, pelo fato desta variável influenciar no trabalho útil do processo de moagem. O trabalho útil realizado pelos corpos moedores depende da sua forma e composição, e do seu tamanho e proporção em massa em relação ao material que será moído. Recomenda-se que na seleção do tamanho do corpo moedor, este seja capaz de fragmentar as maiores partículas da alimentação. Sabe-se que à medida que o tamanho das bolas diminui, a superfície disponível de atrito entre as bolas, para moagem de pequenas partículas, aumenta, o que resulta em alta relação de redução do material na moagem; em contrapartida, para tamanho de bolas maiores, a tensão entre as superfícies em contato aumenta,

tornando-se possível a fragmentação de partículas maiores. Neste contexto, os diâmetros das bolas de aço selecionados foram: 15, 25 e 35 mm;

- (iv) Fator de enchimento: é a porcentagem do volume do moinho ocupado por corpo moedor, incluindo os vazios. Geralmente, o fator de enchimento utilizado para moinho de transbordo, em que a alimentação e a descarga do material ocorrem na mesma abertura, é entre 30% e 45%. Pelo fato desta pesquisa investigar a moagem seletiva, o fator de enchimento foi de 1% e 2%.

Os resultados brutos do medidor de energia elétrica foram comparados com o consumo de energia específica. Para isso, fez-se necessário calcular a potência proposta por Rowland Jr. (1986) para moinhos menores que 2,44 m, como exhibe a Equação 3.3.

$$kW_b = 6,3 D^{0.3} \operatorname{sen} \left(51 - 22 \left(\frac{2,44-D}{2,44} \right) \right) (3,2 - 3V_p) C_s \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10C_s)}} \right) \quad (3.3)$$

em que:

kW_b = quilowatts por tonelada de bolas, no eixo pinhão (kW/t);

D = diâmetro interno do moinho (m);

V_p = fração do volume interno do moinho ocupado pelas bolas;

C_s = fração da velocidade crítica.

Com o valor da potência de Rowland (Eq. 3.1) e o tempo de moagem (Tabela 3.2), tem-se o consumo de energia específica, que pode ser calculada pela Equação 3.4.

$$kWh/t = t * kW_b \quad (3.4)$$

sendo que:

kWh/t = quilowatts-hora por tonelada de bolas, no eixo pinhão (kWh/t) ;

t = tempo (minutos);

kW_b = quilowatts por tonelada de bolas, no eixo pinhão (kW/t).

A análise da remoção da pasta de cimento superficial dos agregados miúdos reciclados de concreto por moagem de baixa energia foi realizada em concordância

com os preceitos estatísticos baseado no teste de hipótese por “distribuição T de Student” em um nível de confiança correspondente a 95%.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AGREGADO RECICLADO

3.5.1 Distribuição granulométrica e morfológica das partículas

A distribuição granulométrica foi determinada por dois métodos, sendo esses peneiramento e análise de imagens dinâmica (AID). O peneiramento foi realizado a úmido em peneiras de aberturas quadradas nas malhas da série Tyler com aberturas nominais de: 12,5 mm; 9,5 mm; 4,8 mm; 2,4 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; 0,3 mm; 0,15 mm e 0,075 mm. A AID foi realizada segundo o procedimento descrito pela norma ISO 13322-2/06 (ISO, 2006), no equipamento modelo Camsizer-L e Camsizer-XT da marca Retsch Technology, tendo sido considerado o parâmetro x_{min}^5 na determinação do diâmetro da partícula. Ainda por AID também foi realizada a análise morfológica das partículas por parâmetros de esfericidade (SPHT) e razão de aspecto (b/l).

3.5.2 Composição química e mineralógica

A determinação da composição química e mineralógica foi realizada para cada fração granulométrica obtida no peneiramento. Para tal, as amostras de cada fração foram previamente cominuídas em moinho de rolos até a dimensão média de partícula na ordem de 1 mm para posterior amostragem e pulverização até tamanho de partículas inferiores a 0,037mm; destaca-se o cuidado de redução de massa (amostragem) apenas após a redução do tamanho máximo das partículas, para mitigar os possíveis erros de amostragem e aumentar a representatividade das alíquotas.

- (i) a composição química foi determinada em amostras fundidas (DUTRA e GOMES, 1984) com tetraborato de lítio anidro, em espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX), da marca Panalytical modelo Zetium, e a perda ao fogo (PF) foi efetuada por gravimetria a 1.050°C por 2h. As

⁵ X_{min} – corresponde à largura da partícula; trata-se do menor valor dentre os diâmetros máximos para distintas orientações de medida e é o parâmetro que mais se assemelha àquele considerado no peneiramento.

análises químicas foram realizadas segundo os procedimentos descrito no Sistema de Gestão da Qualidade do Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, sendo o controle realizado por meio de análise de amostras em duplicatas e curvas de calibração para análises quantitativas dos dez maiores elementos de rochas estabelecidas a partir de materiais certificados de referência;

- (ii) a composição mineralógica por difração de raios X (DRX) (FORMOSO, 1984; BISH e POST, 1989) foi efetuada pelo método do pó, em difratômetro em arranjo geométrico Bragg-Brentano Bruker modelo D8 Endeavor com tubo de cobre (K_{α} -1,5406 Å), 40 kV de tensão, corrente de 50 mA, com a faixa de varredura de 2θ -2-70° e detector Lynxeye XE sensível à posição, passo de 0,02° e tempo de aquisição de uma hora. As fases presentes foram identificadas por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) e *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD); a análise semiquantitativa da proporção das fases constituintes foi efetuada pelo método *Reference Ratio Intensity* (RIR).

3.5.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água para agregados miúdos foi determinado em triplicata conforme a norma NM30 (ABNT, 2001). Segundo a diretriz, a amostra, de granulometria entre 4,8 mm e 0,15 mm, deve permanecer imersa em água por 24 horas, e, posteriormente, a água superficial é removida por meio de um fluxo suave de ar quente até atingir a condição de superfície saturada seca (SSS). Para validação do teste, a amostra é colocada em um molde e, suavemente, aplicam-se 25 golpes com uma haste de compactação, em seguida levanta-se o molde verticalmente, se este desmoronar parcialmente significa que a SSS foi alcançada (Figura 3.9 (b)), caso contrário (Figura 3.9 (a)), deve-se continuar secando a amostra.

Figura 3.9 - Determinação da condição SSS em que (a) SSS não foi alcançado e (b) SSS foi atingido



(a) Material ainda com umidade superficial



(b) Material sem umidade superficial em condição de SSS

Após a determinação da condição SSS, a amostra foi colocada em uma estufa a 100 °C por 24 horas. Por fim, determinou-se a absorção de água segundo a Equação 3.5.

$$A(\%) = \frac{M_{SSS} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \quad (3.5).$$

definindo-se:

A (%) = absorção de água em porcentagem;

M_{SSS} = a massa na condição de superfície saturada seca;

M_{seca} = a massa seca a 100°C em estufa por 24 horas.

3.5.4 Teor da pasta de cimento

O método para determinar o teor da pasta de cimento em agregados reciclados ausente de agregado calcário foi determinado por lixiviação em ácido clorídrico (HCl). A metodologia, conforme Quarcioni e Cincotto (2006), baseia-se no fato de que a dissolução do resíduo de concreto no HCl resulta em pelo menos duas diferentes fases: a insolúvel, formada pelo agregado natural, e a solúvel, constituída por cimento e cal.

Para a realização da lixiviação, 4 alíquotas de cada fração granulométrica entre 4,8 mm e 0,075 mm foram pulverizadas, de modo que todas as partículas se

tornassem inferiores a 0,15 mm. Na sequência, 1,0 g de cada alíquota foi amostrada e adicionada, separadamente, a uma solução de HCl (33%) e seguidas para uma chapa de aquecimento por cerca de 20 minutos ou até cessar a efervescência. Após, o resíduo insolúvel foi lavado com uma solução de carbonato de sódio (10%) a temperatura ambiente, para garantir a dissolução completa da fase de silicato e evitar o ataque do agregado. A solução foi filtrada à vácuo através de um papel de filtro quantitativo 42 em funil de Buchner. Assim, o resíduo insolúvel retido no papel foi seco a 100°C e pesado, a fim de quantificar o conteúdo de rochas, cerâmicas, argilominerais e micas (QUARCIONI e CINCOTTO, 2006). O teor de pasta de cimento foi estimado como sendo o teor de aglomerantes (fase solúvel) e calculado a partir da Equação 3.6.

$$T(\%) = 1 - RI(\%) \quad (3.6).$$

em que:

T (%) = o teor dos aglomerantes em porcentagem (estimativa do teor de pasta de cimento);

RI (%) = o resíduo insolúvel em relação a massa da alíquota inicial em porcentagem.

O procedimento de Quarcioni e Cincotto (2006) foi reproduzido por Angulo et al (2009) com agregados reciclados de diferentes origens. O resultado da pesquisa demonstrou que o teor de pasta de cimento em amostra de RCD ausente de agregado calcário também pode ser estimado pela soma dos teores de óxido de cálcio (CaO) com a perda ao fogo (PF) a 1.050°C.

Deste modo, este estudo avaliou a relação entre a soma de CaO e PF, obtidos por meio da análise de composição química (conforme descrito no item 3.5.2), como um critério adicional para estimar o conteúdo de pasta de cimento no agregado reciclado.

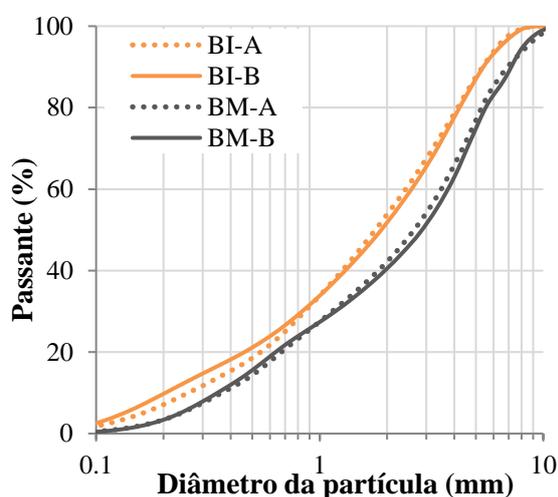
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 BRITAGEM PARA AVALIAÇÃO DA LIBERAÇÃO

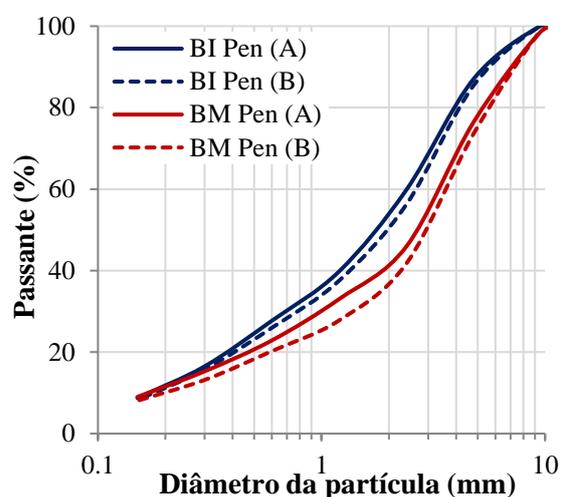
4.1.1 Distribuição granulométrica e morfologia das partículas

A Figura 4.1 apresenta as distribuições granulométricas comparativas entre as alíquotas A e B dos britadores de mandíbulas (BM) e de impacto (BI) obtidas por peneiramento úmido (Pen) e análise de imagens dinâmica (AID), enquanto a Figura 4.2 exibe a partição em massa dos agregados reciclados gerados após a britagem.

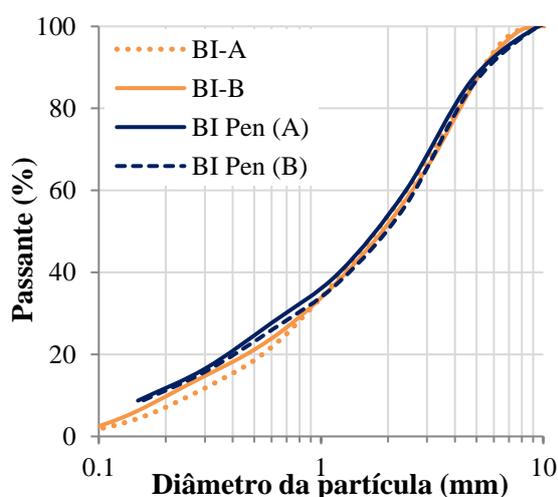
Figura 4.1 - Análise comparativa da distribuição granulométrica entre as alíquotas A e B do BI e BM obtidas por diferentes técnicas de caracterização



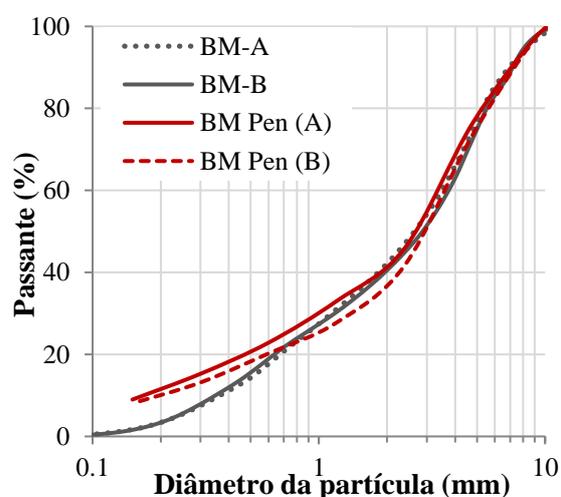
(a) AID das amostras A e B



(b) Peneiramento das amostras A e B

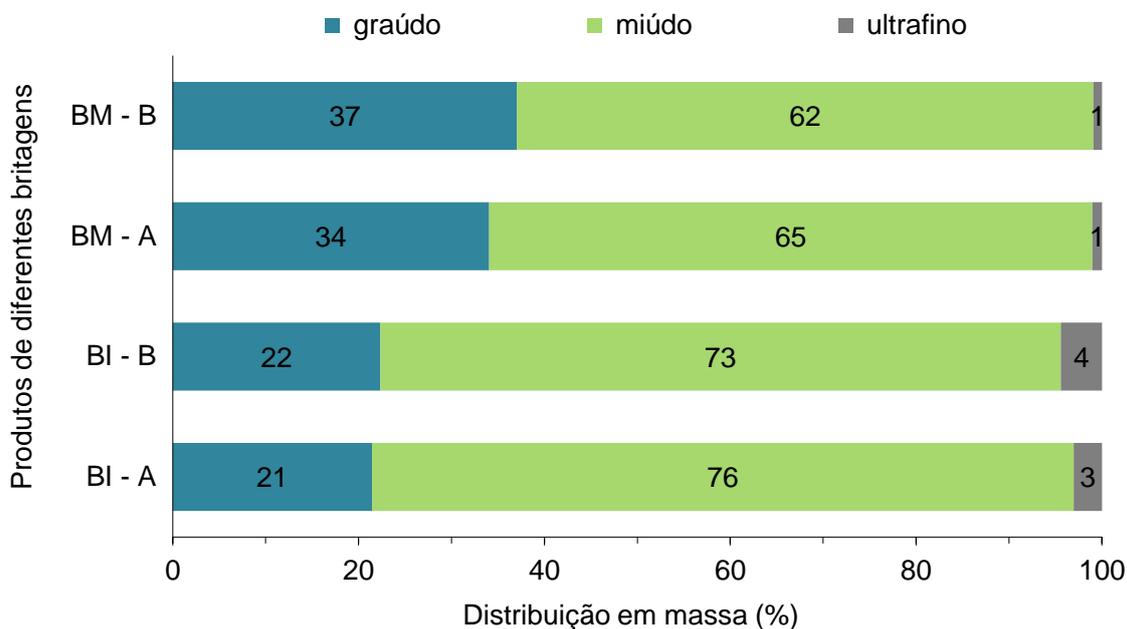


(c) Amostras de BI por diferentes técnicas



(d) Amostras de BM por diferentes técnicas

Figura 4.2 - Distribuição em massa dos produtos após britagem em britadores de mandíbulas e de impacto



Os britadores de mandíbulas e de impacto foram configurados para que ambos gerassem um produto com $P_{80} = 4,8$ mm. Entretanto, houve um deslocamento entre as curvas de BI e BM, conforme demonstra a Figura 4.1 (a) e (b), possivelmente associado a heterogeneidade da alíquota inicial, mesmo após as sucessivas etapas de homogeneização. Em testes preliminares (pré-teste), com amostra de massa reduzida, os equipamentos foram ajustados e as curvas resultantes ficaram sobrepostas, porém, na realização da britagem de todo material, as curvas se divergiram, o que foi atribuído a heterogeneidade da alíquota inicial utilizada nos testes preliminares. Deste modo, ressalta-se a importância da amostragem em estudos de agregados reciclados. Dessa forma, é pouco preciso afirmar que o britador de mandíbulas produz maior proporção de agregados graúdos do que o britador de impacto, tendo em vista que os ajustes de *top-size* foram diferentes. Pelo deslocamento paralelo das curvas granulométricas do BI e BM, é provável a sobreposição das curvas caso a configuração de *top-size* ($P_{80} = 4,8$ mm) fosse atingida.

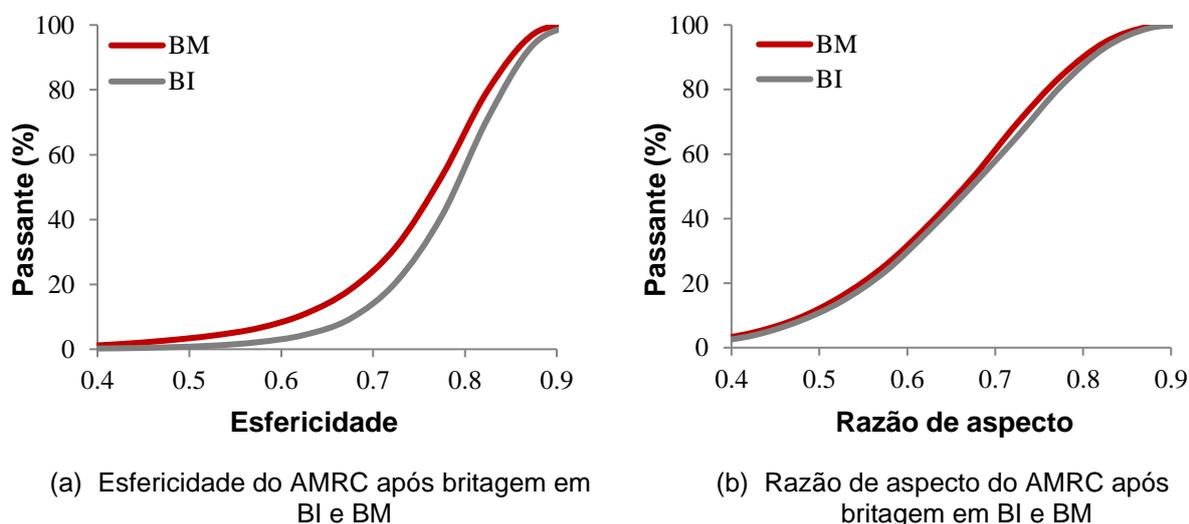
Na literatura, afirma-se que a distribuição granulométrica por peneiramento a úmido resulta em um fracionamento de partículas mais eficiente comparado ao peneiramento a seco (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982). No entanto, a análise de

imagens dinâmicas apresenta resultados de distribuição de tamanho de partículas similares aos do peneiramento a úmido, como apresenta a Figura 4.1 (c) e (d), especialmente nas frações acima de 0,60 mm, devido as partículas terem maior facilidade de dispersão em meio seco. Além disso, as curvas de distribuição granulométrica A e B de mesma técnica e britagem são similares entre si, e essa semelhança é mais evidente na AID (Figura 4.1 (a)).

A distribuição granulométrica por meio da AID também pode ser analisada em função da partição em massa da granulometria dos agregados reciclados gerados após a britagem (Figura 4.2), sendo a massa obtida em: BM-A equivalente a 34% de gráudo, 65% em miúdo e 1% de ultrafino; BM-B igual a 37% de gráudo, 62% de miúdo e 1% de ultrafino; BI-A proporcional a 21% de gráudo, 76% de miúdo e 3% de ultrafino; BI-B correspondente a 22% de gráudo, 73% de miúdo e 4% de ultrafino.

Em paralelo aos resultados granulométricos, a AID reporta os dados referentes à morfologia das partículas, sendo estes apresentados na Figura 4.3 em termos de distribuição granulométrica.

Figura 4.3 - Análise morfológica comparativa do produto de BI e BM



Os resultados de esfericidade (Figura 4.3 (a)) mostram que o britador de impacto gera partículas com valores mais próximos de 1 quando comparadas às partículas do britador de mandíbulas, já na razão de aspecto (Figura 4.3 (b)) os resultados se apresentaram próximos. Estudos anteriores demonstraram que pequenas variações nos parâmetros de forma (inferiores a 0,1) em ambos os

parâmetros afeta substancialmente o efeito dos agregados miúdos reciclados na reologia das misturas cimentícias (HAWLITSCHKEK, 2014).

4.1.2 Composição química

A Tabela 4.1 sumariza a composição química das alíquotas A e B juntamente com os valores de PF, ambas agrupadas por intervalos granulométricos em função da semelhança composicional; em destaque, estão as amostras totais sem fracionamento. As composições químicas de cada fração granulométrica estão no Apêndice A.

Tabela 4.1 - Sumário da composição química dos produtos obtidos por britagem

Fração (mm)	Teores (%)							Distribuição no ensaio (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
B.M. A	66,5	10,4	7,60	3,20	2,70	2,20	6,20	100	100	100	100	100	100
9,5-2,4	65,1	12,8	5,70	3,70	3,70	3,10	3,90	53,5	61,1	45,9	60,9	59,6	67,2
2,4-0,15	70,5	8,20	7,60	2,60	2,60	1,50	6,20	39,3	30,2	35,9	31,6	29,9	27,1
< 0,15	52,7	10,1	15,7	2,60	3,70	1,40	12,2	7,2	8,70	18,2	7,50	10,5	5,70
B.M. B	67,1	10,5	7,60	3,20	2,90	2,20	5,72	100	100	100	100	100	100
9,5-2,4	65,8	13,0	5,40	3,80	3,40	3,10	3,70	57,6	65,1	51,0	65,5	60,1	71,1
2,4-0,15	70,9	8,00	7,60	2,50	2,30	1,40	6,20	36,1	27,1	33,1	27,8	29,8	24,0
< 0,15	52,7	10,2	15,4	2,60	3,60	1,30	12,1	6,50	7,90	15,9	6,60	11,1	4,90
B.I. A	66,6	10,3	7,80	3,10	3,00	2,20	5,75	100	100	100	100	100	100
9,5-2,4	63,0	13,0	7,30	3,50	3,60	3,10	4,80	39,2	49,9	39,3	45,9	45,0	56,2
2,4-0,15	69,8	8,80	7,10	2,80	2,80	1,70	5,70	53,8	42,2	45,5	46,8	42,0	38,5
< 0,15	53,5	10,1	13,7	2,60	4,60	1,50	11,4	7,10	7,80	15,4	7,20	12,0	5,30
B.I. B	66,1	10,1	8,00	3,10	3,30	2,10	6,00	100	100	100	100	100	100
9,5-2,4	63,5	12,5	7,40	3,60	3,40	2,90	5,10	42,2	50,2	42,5	48,8	45,5	55,7
2,4-0,15	70,0	8,80	7,10	2,80	2,70	1,70	5,60	51,1	42,1	43,1	44,4	42,6	38,9
< 0,15	53,9	9,9	13,6	2,60	4,60	1,40	11,5	6,70	7,70	14,4	6,80	11,9	5,40

De acordo com os dados da composição química dos agregados miúdos de concreto reciclados (B.M. A, B.M. B, B.I. A e B.I. B), os valores que se assemelham foram agrupados, o que resultou em três intervalos granulométricos, sendo esses: partículas inferiores a 9,5 mm e maiores do que 2,4 mm; entre 2,4 mm e 0,15 mm; e partículas passantes na malha de 0,15 mm.

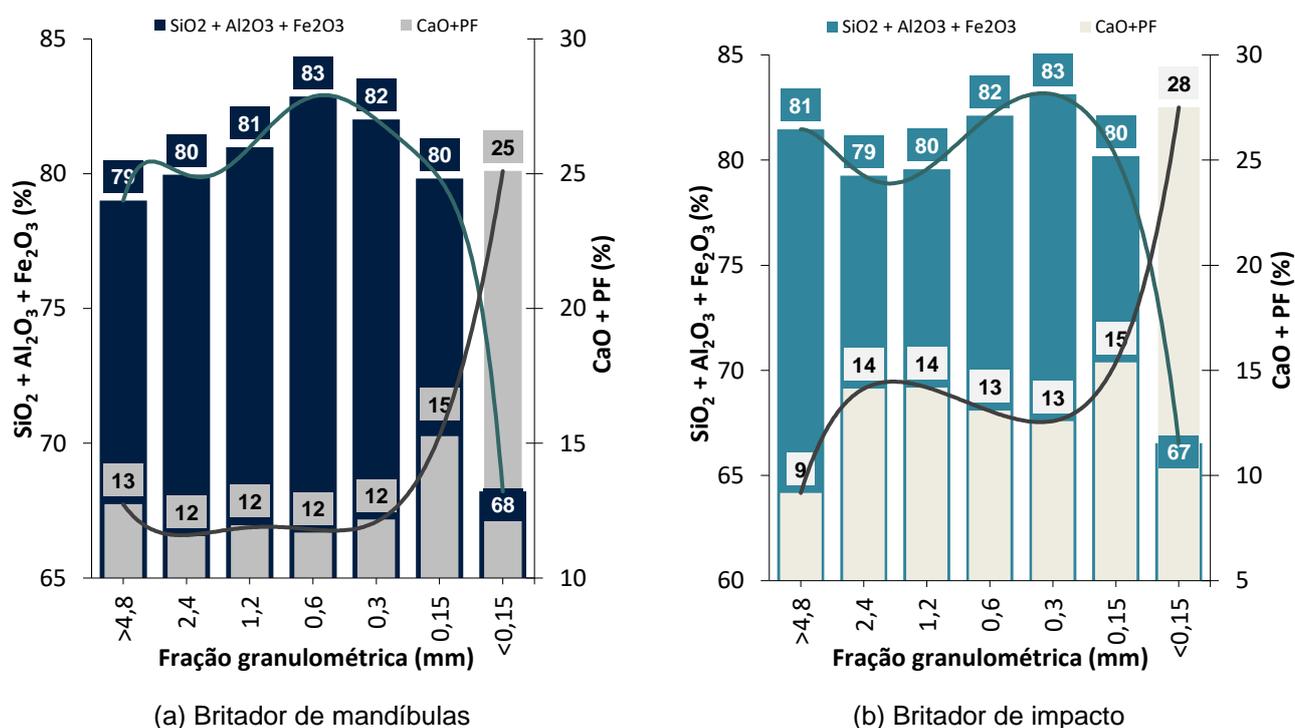
Os principais óxidos constituintes nas quatro amostras sem fracionamento são: sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e o óxido de cálcio (CaO), que somados com a

perda ao fogo (PF) ultrapassam 90% dos teores; e em menores proporções: óxido de potássio (K_2O), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de sódio (Na_2O).

Ao se comparar os produtos dos britadores de mandíbulas e de impacto, percebem-se sutis variações de teores entre os óxidos constituintes, bem como a composição granuloquímica das alíquotas A e B de mesmo método de britagem, por sua vez, indica que o procedimento de homogeneização realizado após a britagem possibilitou a diminuição da heterogeneidade na amostra. Deste modo, reitera-se a importância da amostragem durante todas as etapas do processamento para não enviesar os resultados.

De acordo com Angulo et al (2009), em amostras de RC ausente de agregados calcários, a soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 estão relacionados aos silicatos presentes nas rochas e areia, ao passo que a soma dos teores de CaO com a PF corresponde a pasta de cimento remanescente de construções anteriores (ou carbonatos, se presentes). A Figura 4.4 apresenta uma correlação entre a soma dos teores de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ com os teores de CaO+PF frente a distribuição de tamanho das partículas em ambos os processos de britagem.

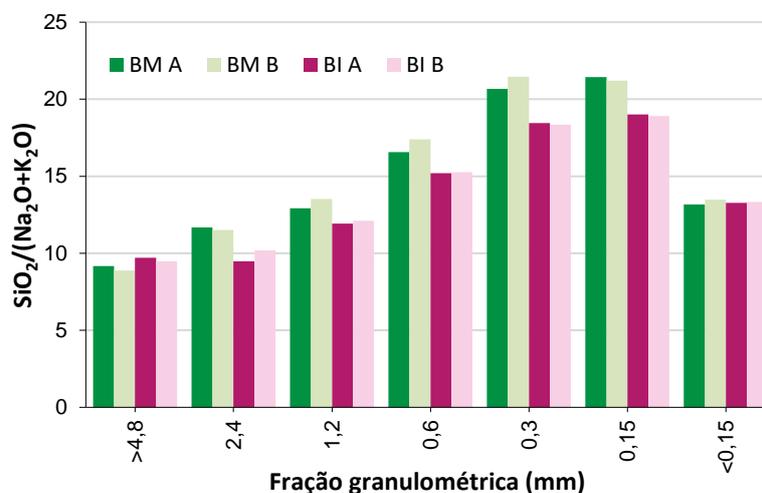
Figura 4.4 – Correlação entre a distribuição granulométrica de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ com os teores de CaO+PF



No produto do BI e do BM (Figura 4.4), nota-se que no intervalo granulométrico entre 4,8 mm e 0,15 mm os teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ foi de 79% a 83% em ambos os produtos, enquanto o teor de $\text{CaO} + \text{PF}$ variou de 9% a 15%. Nas frações abaixo de 0,15 mm, o comportamento dos produtos se difere, de modo que há uma expressiva redução nos teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, 67% e 68%, e aumento no conteúdo de $\text{CaO} + \text{PF}$, 25% e 28%. Deste modo, os dados demonstram haver uma estreita correlação entre a fração granulométrica e a composição química, tal como já observado em estudos anteriores (ANGULO et al, 2009).

Segundo Ulsen (2011), a fração entre os teores $\text{SiO}_2/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ pode ser indicada pela proporção relativa entre o quartzo e os aluminossilicatos oriundos das rochas britadas (principalmente feldspatos) na amostra, sendo a sílica presente em todos os silicatos, enquanto os óxidos K_2O e Na_2O estão contidos majoritariamente nos feldspatos. A Figura 4.5 apresenta essa proporção.

Figura 4.5 - Proporção relativa entre quartzo e aluminossilicatos a partir da relação $\text{SiO}_2/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ no produto de BI e BM



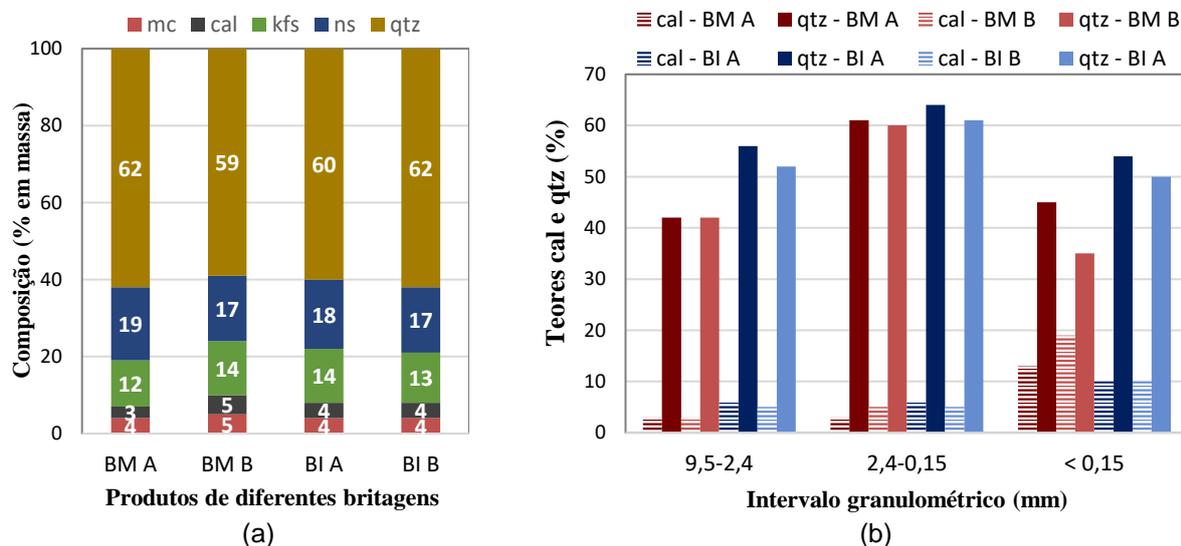
A partir da Figura 4.5, percebe-se uma tendência ao enriquecimento dos teores de $\text{SiO}_2/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$, entre as frações 4,8 mm e 0,15 mm para o produto dos britadores de mandíbulas e de impacto; essa relação diminui nas frações mais grossas possivelmente pelas dificuldades de cominuição do RC e, conseqüentemente, liberação entre as fases, o que resultou em um maior teor de feldspato e menor porcentagem de quartzo em frações granulométricas maiores. Este intervalo granulométrico foi o mesmo de maior concentração dos teores de SiO_2

+ Al_2O_3 + Fe_2O_3 ; sendo ambos os teores referentes aos minerais do grupo dos silicatos presentes nas rochas e areia (ANGULO et al, 2009; ULSEN, 2011).

4.1.3 Composição mineralógica

A Figura 4.6 (a) apresenta a composição mineralógica semiquantitativa dos produtos do britador de impacto e de mandíbulas e a Figura 4.6 (b) a proporção de quartzo e calcita por intervalo granulométrico. As análises da composição mineralógica por difração de raios X pelo método *Reference Ratio Intensity* (RIR) estão no Apêndice B.

Figura 4.6 - Composição mineralógica semiquantitativa dos produtos de britagem (a) e proporção de calcita e quartzo por intervalo granulométrico (b)



Obs: BM = britador de mandíbulas, BI = britador de impacto, mc = micas, cal = calcita, kfs = feldspato potássico, ns = feldspato sódico, qtz = quartzo.

A análise semiquantitativa da composição mineralógica demonstra que nas alíquotas há quartzo (59% a 62%), feldspato sódico (17% a 19%), feldspato potássico (12% a 14%), micas (4% a 5%) e calcita (3% a 5%), em diferentes proporções (Figura 4.6 (a)).

Os teores de calcita são preferencialmente referentes à pasta de cimento remanescente nos agregados reciclados e, posteriormente, ao conteúdo de calcita, sendo que a distinção entre essas fases não pode ser alcançada por difratometria de raios X. Entretanto, os agregados constituintes na amostra são de origem granítica,

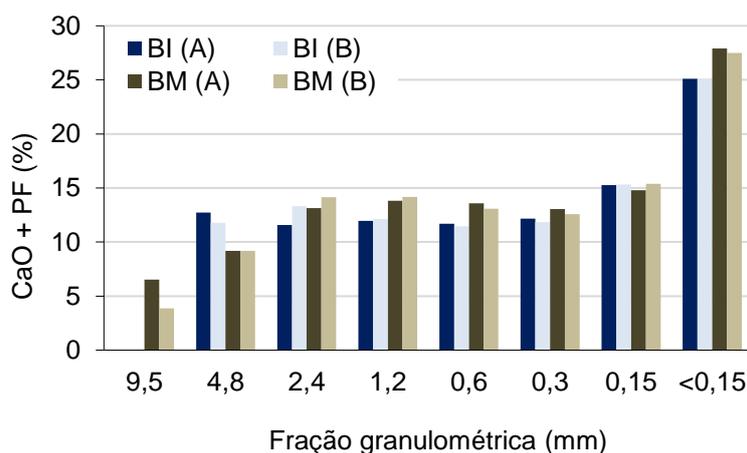
deste modo, admite-se que o teor de calcita esteja majoritariamente associado à pasta de cimento; e os agregados de calcita, se presentes, devem ser encontrados em pequenas proporções. Os feldspatos estão relacionados aos elementos K_2O e Na_2O , e assim como quartzo, são fases provenientes da areia siliciosa, que contém SiO_2 , existente na amostra (ANGULO et al, 2009; EVANGELISTA et al, 2015).

A composição mineralógica (% em massa) dos quatro produtos foram sutilmente variados. Ao se comparar os teores de calcita e de quartzo (Figura 4.6 (b)), nota-se que no intervalo de 2,4 mm a 0,15 mm há um enriquecimento do mineral quartzo ante a um reduzido teor de calcita (pasta de cimento), enquanto na fração abaixo de 0,15 mm esse fato se inverte; portanto, há maior proporção de pasta de cimento e decréscimo de quartzo. Essa análise está de acordo com a composição química, em que o teor de sílica é essencialmente relacionado ao quartzo e o óxido de cálcio à pasta de cimento.

4.1.4 Teor da pasta de cimento e teste de absorção de água

A somatória dos teores de CaO com a PF é exposta de forma comparativa entre as frações granulométricas das alíquotas A e B do BI e BM na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Comparativo do conteúdo estimado de pasta de cimento por fração granulométrica



Obs: BM = britador de mandíbulas, BI = britador de impacto, CaO+PF = pasta de cimento.

A pasta de cimento possui menor resistência à fragmentação em comparação aos agregados naturais presentes no concreto, portanto, possui uma predisposição a se decompor e se concentrar em frações <0,15 mm (ULSEN et al, 2013; ANGULO

et al, 2009). A Figura 4.7 corrobora tal afirmação, de modo que há pequenas variações de teor de pasta de cimento (CaO+PF) no intervalo granulométrico entre 4,8 mm e 0,15 mm e maior enriquecimento na fração abaixo de 0,15 mm; essa ocorrência pode ser percebida nas quatro amostras.

O teor da pasta de cimento também foi estimado pelo resíduo solúvel da lixiviação de HCl. Os resultados juntamente com os de absorção de água e suas respectivas análises estatísticas por distribuição T de Student são dispostos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Absorção de água (0,15 mm – 4,8 mm), resíduo solúvel (0,075 mm – 4,8 mm) e análise estatística dos resultados

Britadores	Absorção de água (%)		Resíduo solúvel (%)	
	média	desv. pad.	Média	desv. pad.
B.M.	4,58	0,406	20,57	0,570
B.I.	3,98	0,113	17,61	0,800
P (bi-caudal)		0,134	0,101	

Hipótese nula: não há diferença entre as amostras (BM=BI)

Hipótese alternativa: há diferença entre as amostras (BM≠BI)

Obs: desv. pad. = desvio padrão, P (bi-caudal) = cálculo estatístico para quantidades de amostras menores do que 30.

A quantificação do resíduo solúvel na alíquota dos britadores de mandíbulas e de impacto são de 20,57% e 17,61% respectivamente, valores consistentes com o teor de pasta de cimento determinada em estudos anteriores (23% g/g) (ANGULO et al, 2009). A absorção de água está dentro do recomendável para aplicação em concreto de até 50 MPa, que de acordo com as normas internacionais a taxa aceitável é de até 10%, para amostra de 4,8 mm a 0,15 mm (RILEM, 1994; PROYECTO GEAR, 2012). Este fato demonstra que os britadores possibilitaram a remoção parcial da pasta de cimento porosa das fases pétreas na granulação de britagem pré-determinada ($P_{80}=4,8$ mm).

O cálculo estatístico aceita a hipótese nula para um nível de confiança igual a 95%; sendo o valor de P (bi-caudal) superior a 0,05, admite-se que não há diferença estatística entre as médias dos testes, tanto da absorção de água quanto do teor de pasta de cimento por lixiviação de HCl, ambos realizados em triplicata. Esses dados endossam a semelhança entre os britadores de mandíbulas e de impacto ao liberar

a pasta de cimento dos agregados naturais, mesmo quando britados em granulação próxima a de liberação entre as fases.

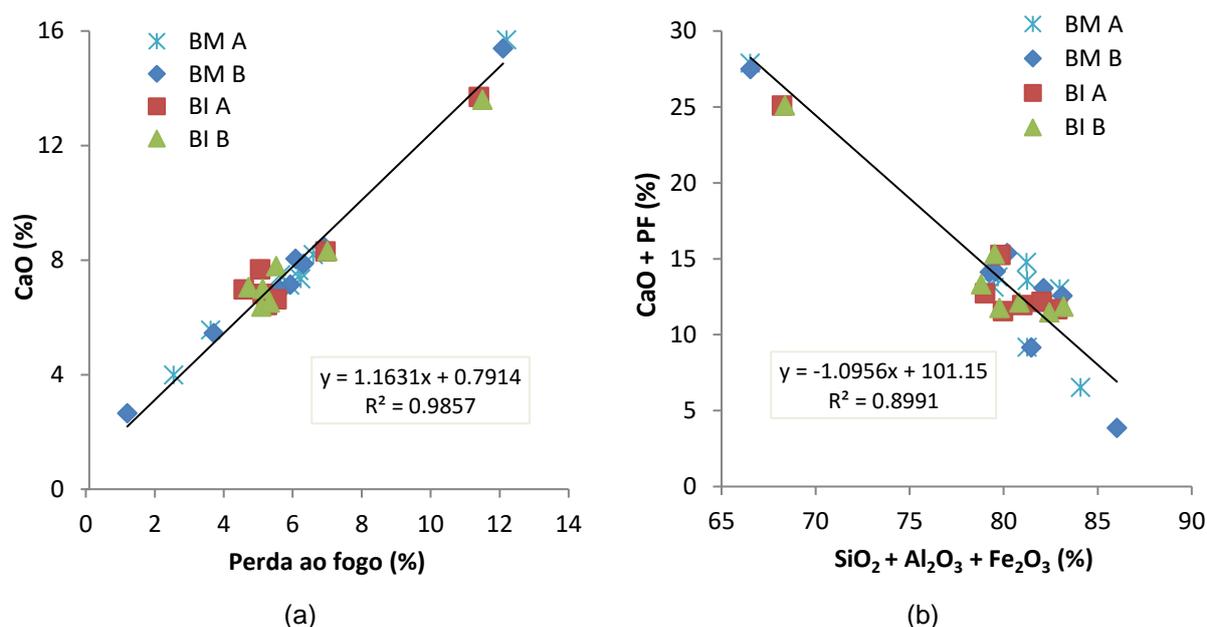
4.1.5 Conclusões parciais sobre a influência do mecanismo de britagem na liberação das fases

Devido à elevada massa inicial do RC, com tamanho de partícula de granulometria grossa (~10 cm), necessitou-se de etapas de processamento e caracterização a fim de mitigar possíveis problemas de heterogeneidade da amostra. Por meio dos resultados de caracterização, pode-se perceber que a qualidade e a representatividade das alíquotas do presente estudo foram alcançadas.

Conforme o resultado qualitativo da análise textural do RC, os britadores de mandíbulas e de impacto foram configurados a fim de gerar um produto com um $P_{80}=4,8$ mm. Os AR de cada processo de britagem foram analisados de forma comparativa para avaliação da liberação das fases constituintes.

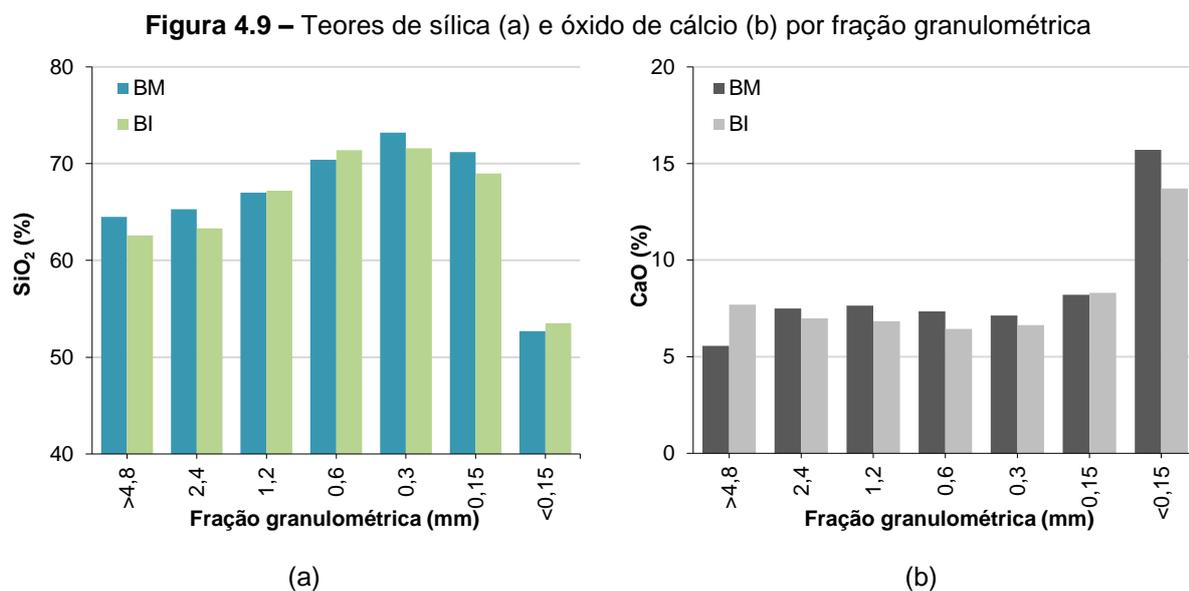
O resultado da distribuição granulométrica mostrou que a proporção média de agregados miúdos produzidos foi de 63,5% para o britador de mandíbulas e 74,5% para o britador de impacto. Os dados também demonstraram haver uma estreita correlação entre a fração granulométrica e as análises químicas (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Relação granuloquímica entre o CaO e a PF (a) e CaO+PF com $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (b)



O teor do óxido de cálcio apresenta uma relação linear positiva com a perda ao fogo (Figura 4.8 (a)), pelo fato das duas variáveis aumentarem simultaneamente a uma taxa constante. Em contrapartida, a soma do óxido de cálcio com a perda ao fogo demonstra ter uma relação linear negativa com a soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro (Figura 4.8 (b)), portanto, o valor de uma variável aumenta enquanto a outra diminui. Além disso, tanto na Figura 4.8 (a) quanto na Figura 4.8 (b), os dados seguem próximo a linha de tendência, portanto, a relação entre as variáveis é forte, sendo esta afirmação confirmada pelo coeficiente de determinação de 0,9857 (Fig. 4.8 (a)) e 0,8991 (Fig. 4.8 (b)).

Segundo Angulo et al (2009), o somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ está associado aos silicatos presentes na amostra, enquanto a soma dos teores de CaO com a PF refere-se à pasta de cimento residual em amostra ausente de agregados calcários. A Figura 4.9 apresenta os teores de sílica e óxido de cálcio por fração granulométrica.



A sílica (Fig. 4.9 (a)) apresenta uma tendência a se concentrar nas frações acima de 0,15 mm, enquanto na fração abaixo de 0,15 mm ocorre sistematicamente uma redução em seu teor e elevação do conteúdo de óxido de cálcio (Fig. 4.9 (b)). A análise mineralógica mostrou estar de acordo com a composição química, sendo o teor de sílica majoritariamente relacionado ao quartzo, e o óxido de cálcio à pasta de cimento (calcita pela DRX). Portanto, pode-se inferir esse comportamento ao

enriquecimento do agregado reciclado em granulometrias acima de 0,15 mm e pasta de cimento em frações inferiores a 0,15 mm.

Ao final, a avaliação comparativa da liberação das fases dos resíduos de concreto por britadores de mandíbulas e de impacto demonstraram ser semelhantes em termos de morfologia de partículas, absorção de água, composição química e mineralógica, de modo que se pode concluir que a liberação da pasta de cimento residual em ambas as rotas de britagem foi análoga, sendo tal afirmação corroborada por cálculos estatísticos.

4.2 MOAGEM DE BAIXA ENERGIA PARA REMOÇÃO DA PASTA DE CIMENTO SUPERFICIAL

4.2.1 Velocidade de operação do moinho

Na Tabela 4.3 se encontram as configurações do moinho de bolas e o consumo de energia em cada teste ao alterar a velocidade crítica do moinho. A Figura 4.10 (a) apresenta a distribuição dos tamanhos das partículas obtidas e (b) suas esfericidades juntamente com a curva da amostra referência - sem o processo de moagem. A Figura 4.11 exhibe o resultado de absorção de água e o desvio padrão para cada condição.

Tabela 4.3 - Configurações do moinho de bolas e a energia consumida para cada condição de velocidade crítica

Variáveis	Teste				
	1	2	3	4	5
Velocidade crítica (%)	40	50	60	70	80
Tempo de moagem (min)	30	30	30	30	30
Diâmetro da bola (mm)	15	15	15	15	15
Enchimento, J (%)	1	1	1	1	1
Massa da amostra (kg)	2	2	2	2	2
Energia consumida (kWh)	20,59	20,32	20,42	19,67	24,10

Figura 4.10 – Análise comparativa da distribuição granulométrica (a) e esfericidade (b) do AMRC produzido por diferentes velocidades de operação do moinho

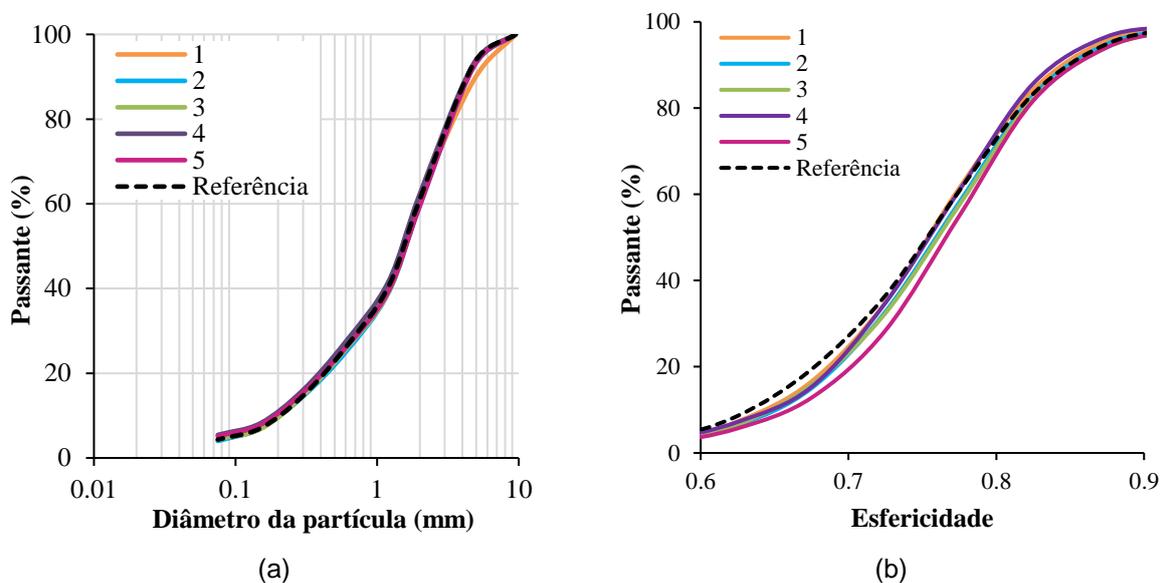
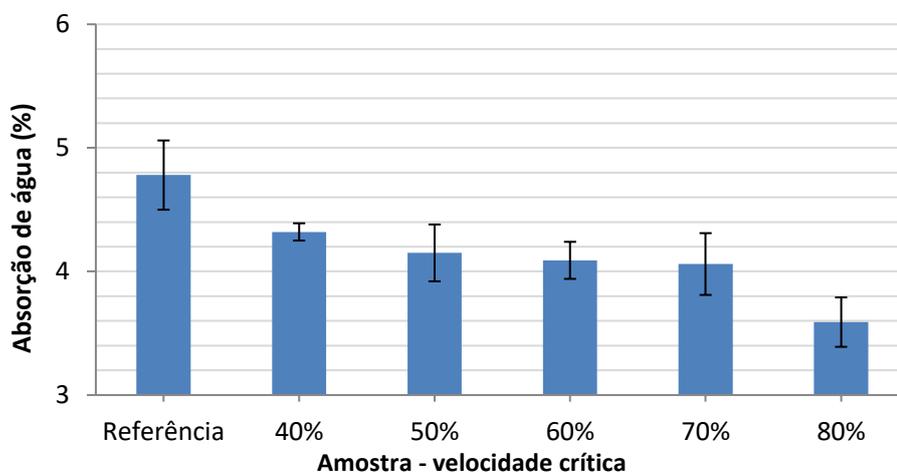


Figura 4.11 - Absorção de água e desvio padrão de cada amostra de AMRC produzida por diferentes velocidades críticas do moinho



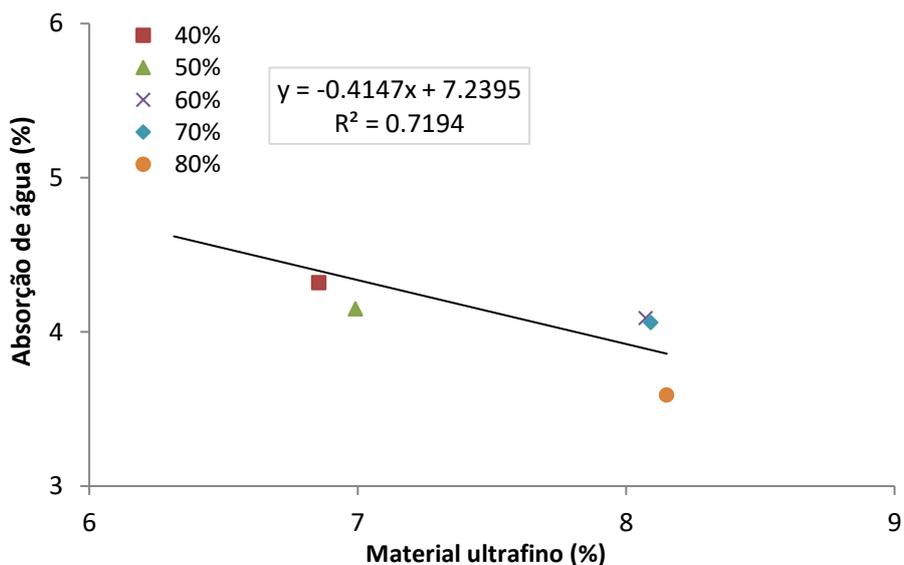
Ao se variar a velocidade crítica do moinho, percebe-se discretas oscilações na distribuição granulométrica dos produtos (Fig. 4.10 (a)), bem como no consumo de energia aferido no processo (Tabela 4.3). Entretanto, ao se contrapor os resultados de absorção de água dos AMRC com a amostra referência, tem-se uma redução em porcentagem de: 4,32 na amostra do teste 1 (VC=40%); 4,15 para o teste 2 (VC=50%); 4,09 no teste 3 (VC=60%); 4,06 na amostra do teste 4 (VC=70%); e 3,59 para a amostra do teste 5 (VC=80%). Portanto, observa-se um decréscimo na

absorção de água à medida que a velocidade de operação do moinho aumenta (Figura 4.11).

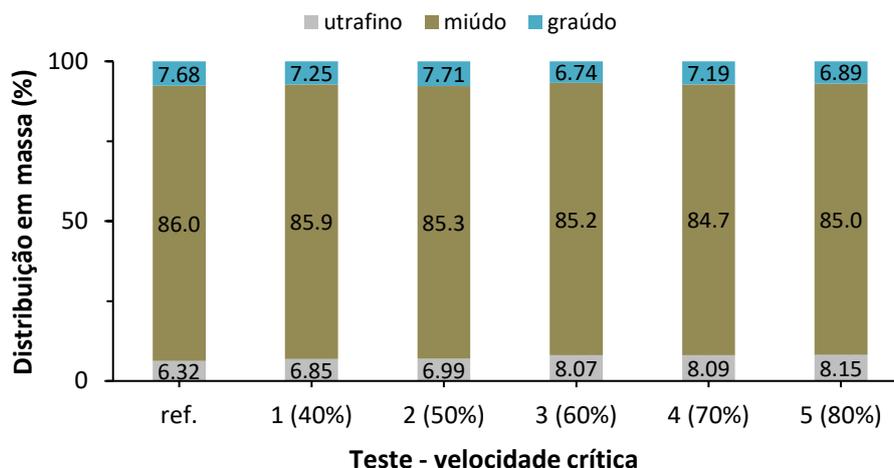
Quanto maior a liberação entre as fases do RC, menor é a presença da pasta de cimento acoplada à superfície do agregado. Após a liberação, a pasta de cimento residual tende a se concentrar em frações abaixo de 0,15 mm, denominada como partícula ultrafina, ao passo que o enriquecimento preferencial do agregado natural ocorre em frações superiores a 0,15 mm (ULSEN et al, 2013).

Neste contexto, a Figura 4.12 apresenta a relação entre a absorção de água e a proporção de partícula ultrafina (<0,15 mm) nos AMRC obtidos por diferentes velocidades operacionais.

Figura 4.12 – Relação entre a absorção de água e a porcentagem em massa de material ultrafino (<0,15 mm) nos AMRC obtidos por diferentes velocidades de operação do moinho



De acordo com a Figura 4. 12, conforme a velocidade crítica foi sendo aumentada, menor foi a absorção de água do agregado (4,8 mm - 0,15 mm) e maior foi a geração de partículas ultrafina; a Figura 4.13 ilustra a partição em massa dos produtos. Essas variáveis demonstram ter uma relação linear negativa forte (coeficiente de determinação: $R^2=0,7194$).

Figura 4.13 – Distribuição em massa dos AMRC obtidos por diferentes velocidades críticas

Dentre as velocidades críticas avaliadas, o teste 5 (VC=80%) foi o resultado com o menor percentual de absorção de água, cerca de 25% a menos ao se comparar com a amostra referência (Figura 4.12), e maior geração de partículas ultrafina (Figura 4.13).

Para uma análise estatística das médias da absorção de água, a Tabela 4.4 exhibe os dados da distribuição T de Student para cada condição. Os resultados estatísticos estão no Apêndice C.

Tabela 4.4 - Análise estatística dos resultados de absorção de água ao oscilar a velocidade crítica

Teste t de Student	Teste					
	Referência	1	2	3	4	5
Média (a.a.)	4,58	4,32	4,15	4,09	4,06	3,59
Desvio padrão (a.a.)	0,28	0,07	0,23	0,15	0,25	0,20
P (bi-caudal)	-	0,264	0,268	0,195	0,113	0,028

Hipótese nula: amostra referência = AMRC após a moagem

Hipótese alternativa: amostra referência \neq AMRC após a moagem

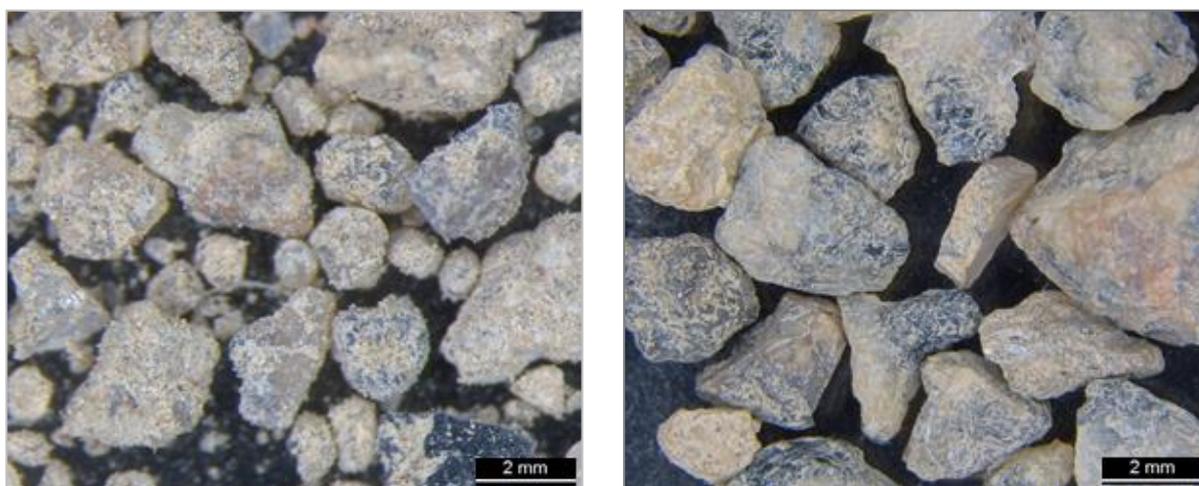
Obs: a.a. = absorção de água

O cálculo estatístico foi realizado a um nível de confiança igual a 95%. Como o número de amostra analisada foi inferior a 30, utiliza-se o valor de significância bilateral (P (bi-caudal)) para avaliar as hipóteses; sendo que, para valores superiores a 0,05, aceita-se a hipótese nula, enquanto para valores inferiores a 0,05, rejeita-se a hipótese nula e aceita-se a alternativa. O resultado do teste 5 foi o único que aceita a hipótese alternativa (P (bi-caudal) = 0,028). Deste modo, o AMRC

demonstra haver diferenças significativas na absorção de água em moagem com alta velocidade. Estudos anteriores também afirmaram que ao elevar a velocidade crítica do moinho de bolas há uma redução na absorção de água do agregado reciclado (DILBAS e ÇAKIR e ATIS, 2019).

A Figura 4.14 mostra uma análise comparativa em microscópio estereoscópico do AMRC, com granulometria entre 4,8 mm e 0,15 mm, da amostra referência produzido por britagem (a), e do AMRC gerado por britagem e moagem (b), de acordo com os parâmetros do teste 5 (VC=80%).

Figura 4.14 – Análise comparativa em microscópio estereoscópico do agregado miúdo reciclado de concreto antes (a) e após (b) a moagem em velocidade crítica de 80%



a) AMRC produzido por britagem

b) AMRC produzido por britagem e moagem

De forma qualitativa, a Figura 4.14 indica haver um maior conteúdo de pasta de cimento à superfície dos agregados produzidos por britagem (a) ante àqueles cominuídos por britagem seguido de moagem (b).

No processo de cominuição por moagem com foco na remoção da pasta de cimento superficial, almeja-se que o agregado natural permaneça intacto enquanto a pasta de cimento seja seletivamente liberada, em um mecanismo de polimento dos grãos. Neste contexto, perante as velocidades críticas consideradas, as condições do teste 5 (VC=80%) alcançou o mecanismo de moagem seletiva, comprovada pelo enriquecimento moderado de 30% das partículas ultrafina após a moagem, de 6,32% para 8,15% de acordo com a Figura 4.13, somado à redução da absorção de água (Figura 4.11), e à suavização da irregularidade superficial das partículas,

indicada pelo sutil deslocamento da curva de esfericidade para a direita no gráfico (Figura 4.10 (b)). A junção desses fatores apoia a diferença entre os AMRC da Figura 4.14 (a) e (b).

Adicionalmente, o consumo de energia no processo foi medido (energia consumida) e calculado (energia específica). Porém, o método de aferição da energia consumida (Tabela 4.3) se mostrou insuficientes nas condições de moagem laboratorial avaliada, mesmo sendo realizados em duplicata e em dias diferentes, sendo que a baixa variação entre as medidas pode ter sido influenciadas por fatores externos não determinados relacionados à temperatura ambiente e às condições da rede elétrica, tais como: tensão, frequência, fator de potência e desequilíbrios em geral.

4.2.2 Tempo de moagem

A Tabela 4.5 apresenta as configurações do moinho de bolas e a energia consumida em diferentes tempos de moagem. Na Figura 4.15 (a) se encontra a análise de distribuição granulométrica dos AMRC gerados, e (b) exhibe a influência entre os tempos de moagem sobre a esfericidade da partícula; os resultados de absorção de água com seu respectivo desvio padrão se encontram na Figura 4.16.

Tabela 4.5 - Parâmetros do moinho de bolas e o consumo de energia para cada tempo de moagem

Variáveis	Teste		
	5	6	7
Velocidade crítica (%)	80	80	80
Tempo de moagem (min)	30	15	60
Diâmetro da bola (mm)	15	15	15
Enchimento, J (%)	1	1	1
Massa da amostra (kg)	2	2	2
Energia consumida (kWh)	24,10	22,82	53,88

Figura 4.15 - Análise da distribuição granulométrica (a) e esfericidade da partícula (b) ao variar o tempo de moagem

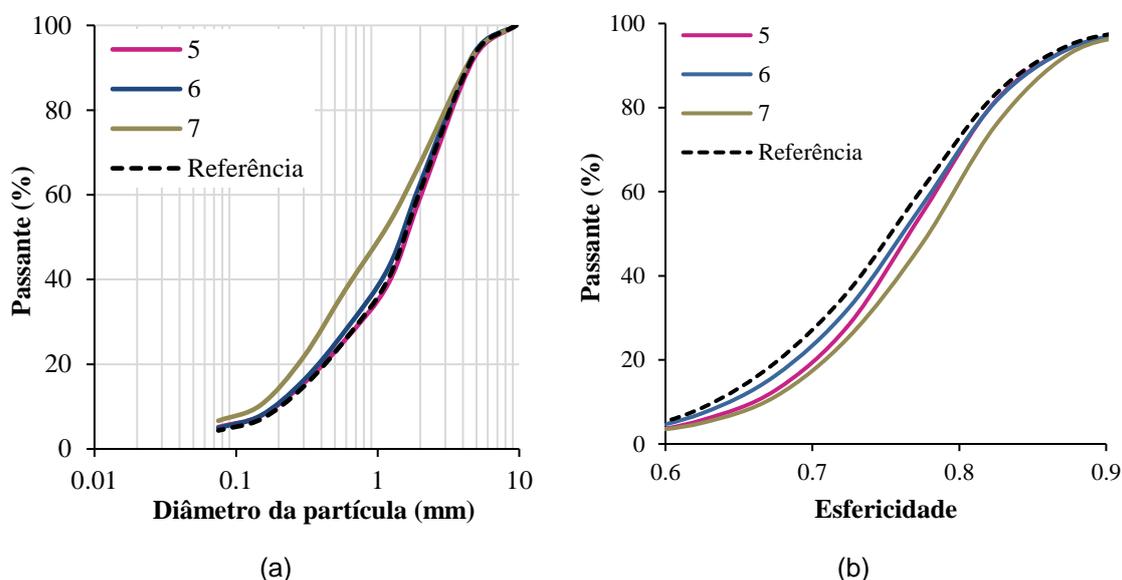
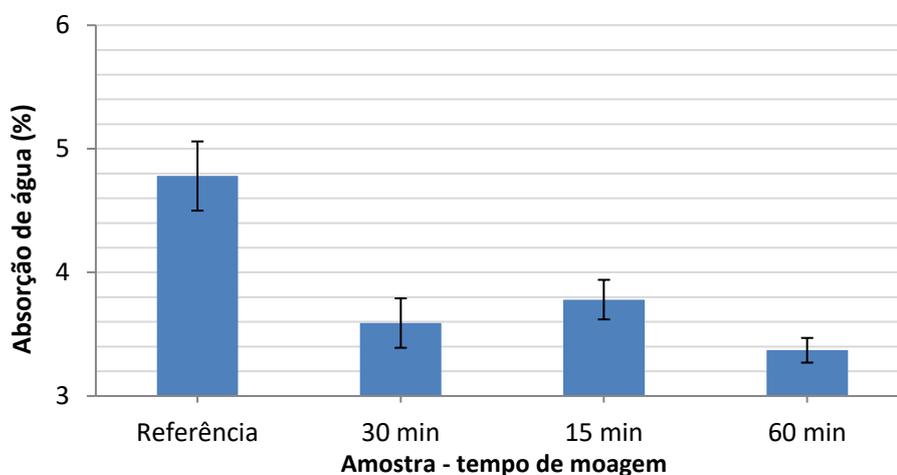


Figura 4.16 - Resultado de absorção de água e seu desvio padrão gerados por diferentes tempos de moagem



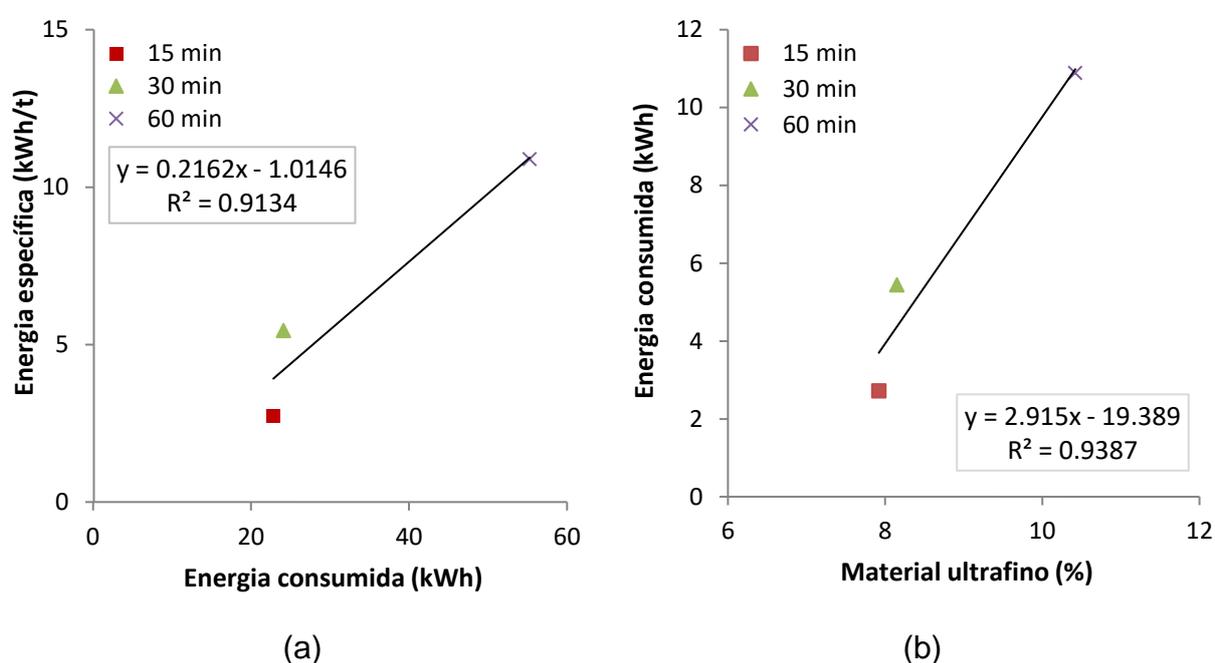
Na Figura 4.15 (a), observa-se um deslocamento de toda curva granulométrica referente ao teste 7 (60 min) para a esquerda no gráfico, o que se indica que em elevado tempo de moagem, o agregado também foi fragmentado e não somente a pasta de cimento, especialmente na fração abaixo de 2 mm.

Nota-se que em longos períodos de moagem, a absorção de água do AMRC foi reduzida (Figura 4.16). Paralelamente, essa relação também pode ser observada no consumo de energia no processo (Tabela 4.5), de modo que na amostra de RC

moída durante 60 minutos (teste 7), a demanda por energia foi mais do que o dobro em relação aos tempos de 15 minutos e 30 minutos, teste 6 e 5 respectivamente (Tabela 4.5).

A Figura 4.17 (a) expressa a relação entre a energia específica e a energia consumida por tempo de moagem, e em (b) se encontra o consumo de energia por porcentagem em massa de material abaixo de 0,15 mm.

Figura 4.17 - Relação entre energia específica e consumida por tempo de moagem (a), e o consumo de energia por percentual de partícula ultrafina passante em 0,15 mm (b)



A relação entre os valores de energia consumida e específica são diretamente proporcionais, sendo corroborado pelo coeficiente de determinação tendendo a 1. Entretanto, os dados da energia consumida são brutos, de modo que os valores não se limitam apenas a potência utilizada para a movimentação da carga e moagem do resíduo, o que resulta em valores de energia medidos e calculados divergentes.

Além disso, percebe-se um alto consumo de energia no teste 7 (60 minutos). Essa variação de valor ante os demais tempos de moagem pode estar associada a transformação da energia cinética em térmica do moinho, devido ao aquecimento dos componentes da instalação, como o motor, o redutor e os mancais e,

consequentemente, perda de trabalho. Portanto, em um elevado tempo de moagem, a demanda por energia no processo pode inviabilizar economicamente a reciclagem de RC.

A Tabela 4.6 exibe o resultado da análise estatística da média do teste de absorção de água por distribuição T de Student para cada tempo de moagem. O resultado detalhado está no Apêndice C.

Tabela 4.6 - Resultado de absorção de água, desvio padrão e análises estatísticas por distribuição T de Student ao variar o tempo de moagem

Absorção de água (%)	Referência	Teste		
		5	6	7
Média	4,58	3,59	3,78	3,37
Desvio padrão	0,28	0,20	0,16	0,10
P (bi-caudal)	-	0,028	0,137	0,018
Hipótese nula: amostra referência = AMRC após a moagem				
Hipótese alternativa: amostra referência \neq AMRC após a moagem				

Ao se comparar os resultados entre os testes 5 (30 minutos) e 6 (15 minutos) ambos foram sutilmente variados perante os dados de distribuição granulométrica, esfericidade da partícula e energia consumida, porém, a redução do percentual de absorção de água do AMRC após a moagem foi de 21,62% para as condições do teste 5 (30 minutos) e 17,47% de acordo com os parâmetros do teste 6 (15 minutos). O resultado da distribuição T de Student a um nível de confiança igual a 95% (Tabela 4.6), assume que essa diferença é estatisticamente significativa, de modo que o AMRC demonstra ter tido uma redução pertinente (aceita a hipótese alternativa) na absorção de água ao ser moído por 30 minutos.

4.2.3 Diâmetro da bola de moagem

As configurações do moinho de bolas e a energia consumida ao se modificar o diâmetro das bolas estão apresentadas na Tabela 4.7. A Figura 4.18 (a) e (b) exibe a distribuição granulométrica e a esfericidade das partículas, respectivamente. Na Figura 4.19 estão os valores da absorção de água e desvio padrão em cada etapa.

Tabela 4.7 - Configurações do moinho de bolas e o consumo de energia ao alterar o diâmetro das bolas

Variáveis	Teste		
	5	8	9
Velocidade crítica (%)	80	80	80
Tempo de moagem (min)	30	30	30
Diâmetro da bola (mm)	15	25	35
Enchimento, J (%)	1	1	1
Massa da amostra (kg)	2	2	2
Energia consumida (kWh)	24,10	27,04	25,93

Figura 4.18 - Análise comparativa da distribuição granulométrica (a) e esfericidade da partícula (b) ao variar o diâmetro das bolas

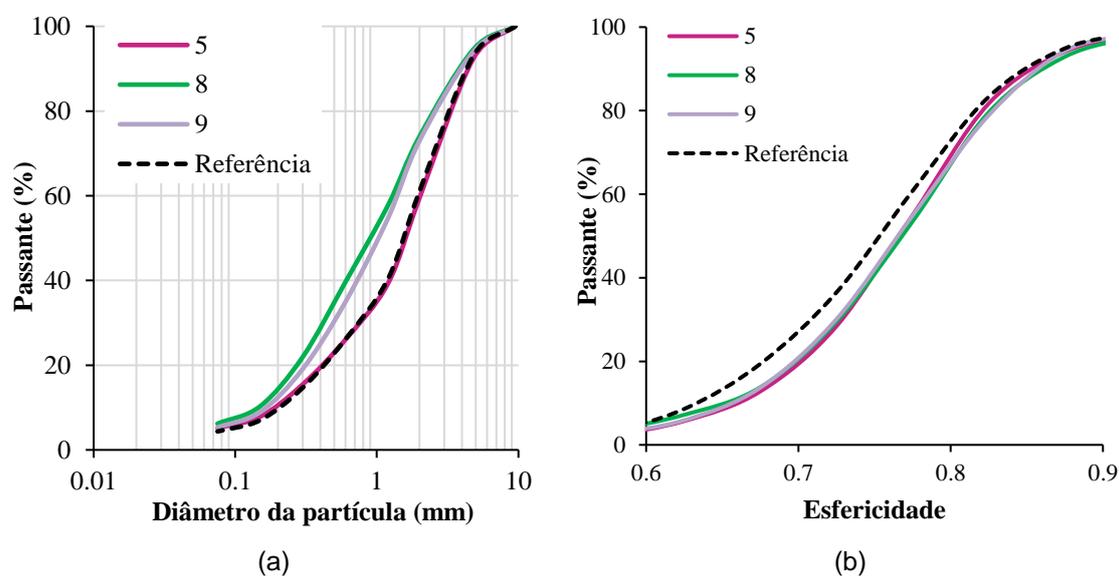
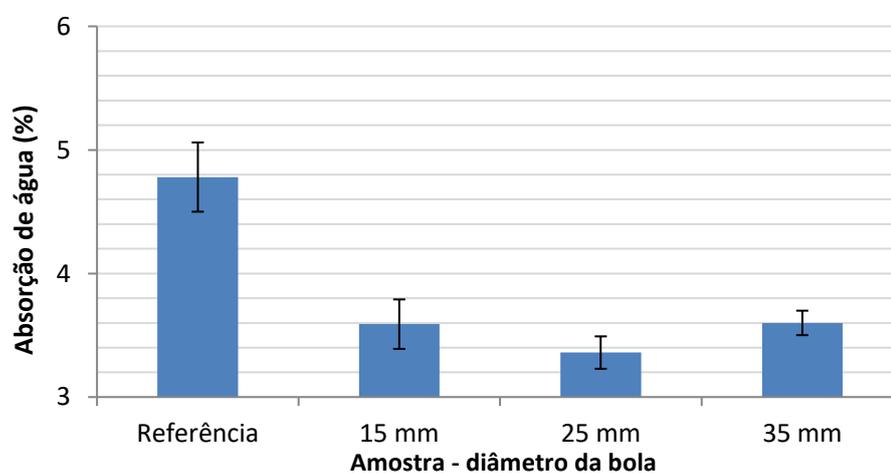


Figura 4.19 – Resultado do teste de absorção de água ao modificar o diâmetro das bolas



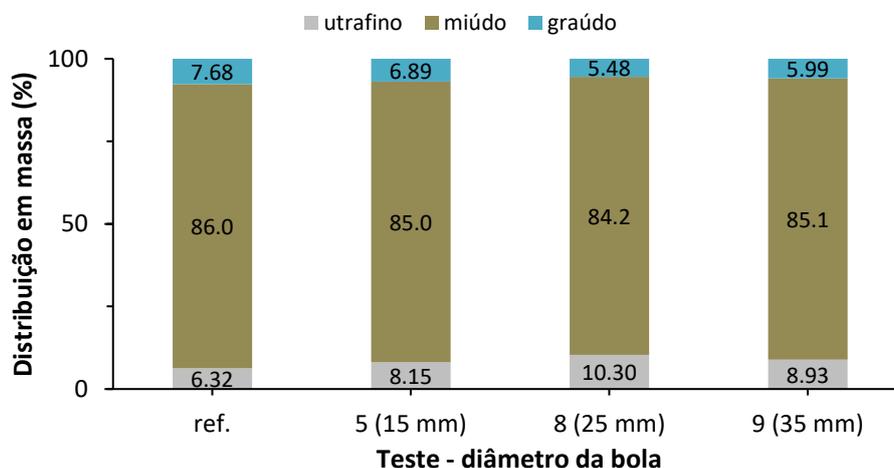
A Figura 4.18 (a) demonstra que conforme se eleva o diâmetro das bolas de moagem a distribuição granulométrica do produto foi sendo reduzida, e essa redução teve um sutil efeito na esfericidade entre os produtos do teste 5 (15 mm), 8 (25 mm) e 9 (35 mm) (b). Além disso, a curva de distribuição granulométrica mais à esquerda no gráfico, somado a uma menor absorção de água (Figura 4.19) e um maior consumo de energia no processo (Tabela 4.7) foi o teste 8, com o diâmetro de bolas igual a 25 mm.

Com o aumento do diâmetro das bolas, a pressão entre as superfícies de contato se eleva, tornando-se possível a quebra de partículas maiores, o que acarreta em um produto com distribuição granulométrica mais fina (LUZ e SAMPAIO e ALMEIDA, 2004). Esse fato associado à cominuição de maior energia - alta velocidade crítica - faz com que o processo de fragmentação seja ainda mais acentuado.

No entanto, o teste 9 (35 mm) teve um menor consumo de energia, além de gerar um produto com maior absorção de água e distribuição granulométrica sutilmente mais grossa ao se contrapor com o teste 8 (25 mm), o que indica que as condições de operação do teste 9 possivelmente excedeu a velocidade crítica do moinho. Assim sendo, as bolas iniciaram um processo de centrifugação, o que reduziu a fragmentação do AMRC.

A Figura 4.20 mostra a partição em massa dos AMRC ao ser cominuído por diferentes diâmetros de bolas de moagem.

Figura 4.20 – Distribuição em massa dos AMRC produzidos por diferente diâmetro de bolas



De acordo com a Figura 4.20, o produto do teste 8 (25 mm) e 9 (35 mm), ante a amostra referência, gerou um acréscimo de partículas ultrafina de 63% (10,3% em massa) e 41% (8,93% em massa), respectivamente. Essa diferença de 22% entre os testes endossa a provável extrapolação da velocidade crítica do moinho no teste 9.

Adicionalmente, com o aumento percentual de material ultrafino no produto, houve também um maior consumo de energia no processo, sendo os valores do teste 8 (25 mm) os mais expressivos. A fórmula da energia específica de Rowland não considera o parâmetro diâmetro e densidade unitária do corpo moedor, portanto, impossibilita a comparação entre o consumo de energia medido e aferido.

4.2.4 Proporção em massa dentro do moinho

Para avaliar o efeito do enchimento em porcentagem de bolas dentro do moinho (J (%)) e em massa do resíduo (massa da amostra – kg), fez-se necessário alterar o tempo de moagem. A tabela 4.8 exhibe as configurações e o consumo de energia no processo de moagem em cada condição. Na Figura 4.21 (a) e (b) está a análise comparativa da distribuição granulométrica e esfericidade das partículas, na sua devida ordem. Os resultados de absorção de água e desvio padrão se encontram na Figura 4.22.

Tabela 4.8 - Configurações do moinho de bolas e energia consumida com a alteração do tempo de moagem e proporção em massa dentro do moinho

Variáveis	Teste		
	10	11	12
Velocidade crítica (%)	80	80	80
Tempo de moagem (min)	15	30	60
Diâmetro da bola (mm)	15	15	15
Enchimento, J (%)	2	2	2
Massa da amostra (kg)	1	1	1
Energia consumida (kWh)	21,83	24,35	55,27

Figura 4.21 - Distribuição granulométrica (a) e esfericidade da partícula (b) ao variar o tempo e a proporção em massa dentro do moinho

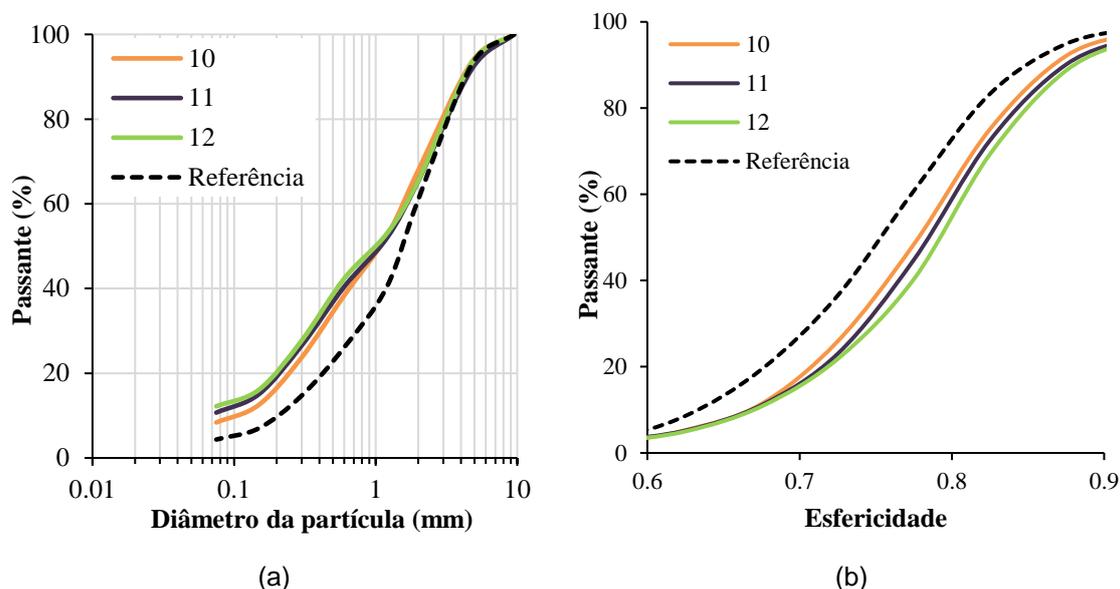
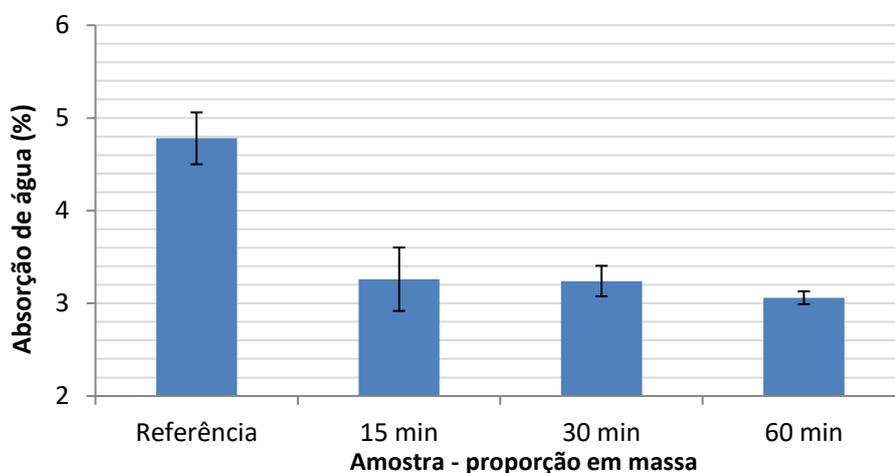


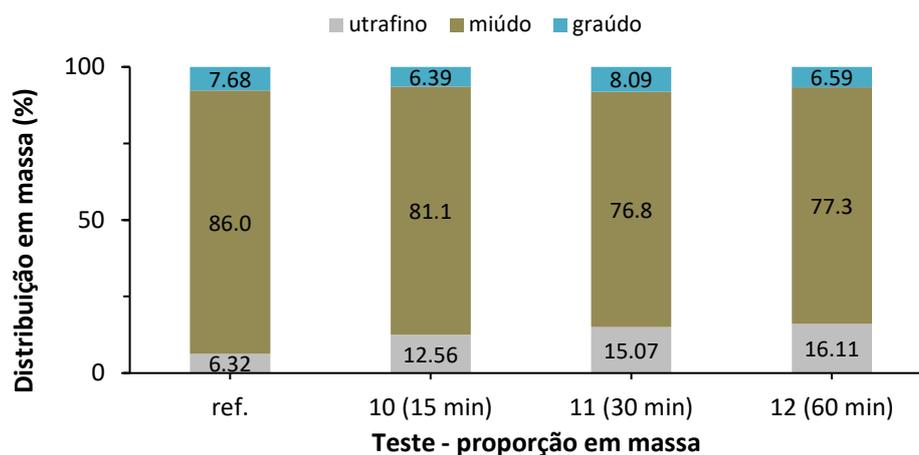
Figura 4.22 – Resultado da absorção de água ao variar o tempo e a proporção em massa dentro do moinho



Ao se elevar o enchimento em porcentagem de bolas e reduzir a massa do resíduo dentro do moinho, o resultado foi um produto com distribuição granulométrica mais fina, especialmente em frações abaixo de 2 mm (Figura 4.21 (a)). Em adicional, com o incremento no tempo de moagem, reduziu-se a absorção de água (Figura 4.22) e suavizou-se as irregularidades na superfície das partículas (Figura 4.21 (b)), porém, elevou-se substancialmente a energia consumida no processo (Tabela 4.8).

Estudo anteriores afirmam que um longo tempo de moagem associado a maiores proporções de bolas do que de resíduo dentro do moinho, resulta em um agregado miúdo reciclado com maior qualidade (KIM, et al 2018). No entanto, essas condições demonstraram ter um maior consumo de energia no processo além de alterar a distribuição em massa do produto, conforme apresenta a Figura 4.23.

Figura 4.23 – Partição em massa dos AMRC produzidos ao variar o tempo e o enchimento dentro do moinho

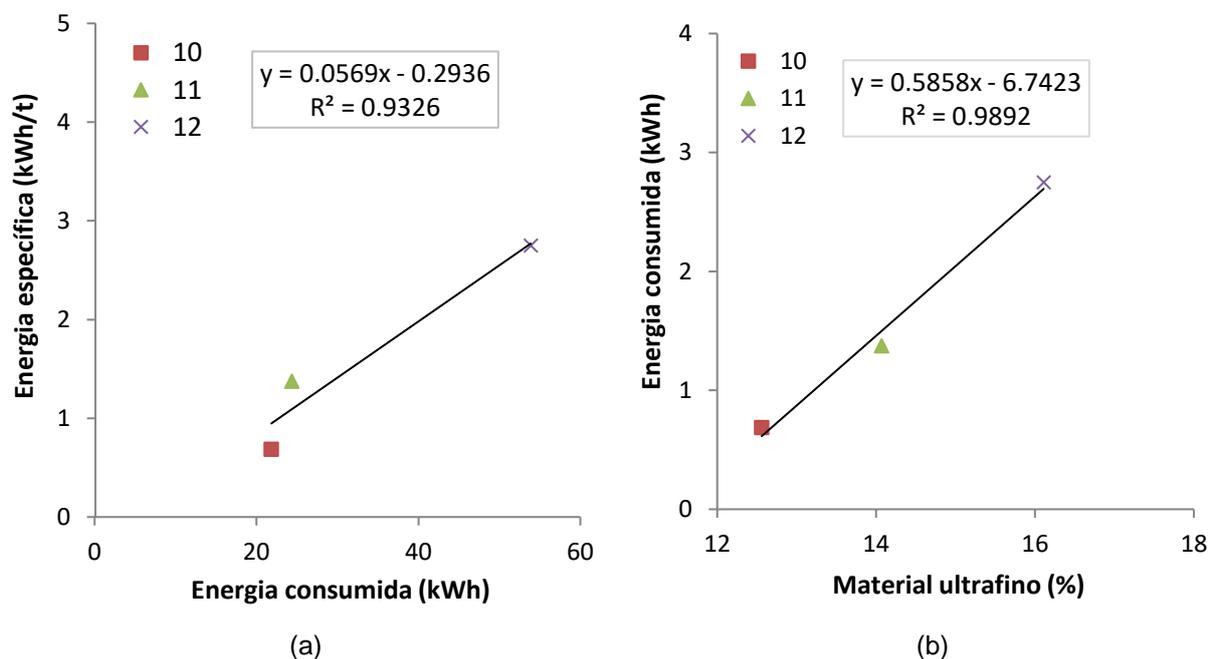


A proporção em massa de material na fração ultrafina aumentou de 6,32% na amostra de referência para 12,56% no teste 10 (aumento de 99%), 15,07% no teste 11 (aumento de 138%) e 16,11% no teste 12 (aumento de 155%).

Segundo Lynch (1979), o consumo de energia é pouco sensível às variações na vazão de alimentação do processo; no entanto, a fragmentação das partículas em moinho de bolas é um evento probabilístico, portanto, ao se alterar o número de partículas dentro do moinho, a probabilidade de ocorrência de quebra também variará.

A Figura 4.24 (a) exhibe a relação entre a energia específica e consumida ao se alterar o tempo de moagem e a proporção em massa dentro do moinho, e na Figura 4.24 (b) se encontra o consumo de energia por porcentagem em massa de fração ultrafina passante em 0,15 mm.

Figura 4.24 – Relação entre energia específica e consumida por proporção em massa (a), e o consumo energético por percentual de partícula ultrafina passante em 0,15 mm (b)



Ao se elevar a massa de bolas e reduzir a massa de amostra dentro do moinho, há uma maior probabilidade de se ocorrer a fragmentação das partículas, que, por sua vez, pode ser acentuada em um maior tempo de moagem, e, portanto, gera-se um produto com distribuição granulométrica fina. A Tabela 4.9 sumariza esses dados juntamente com os resultados dos testes de variação do tempo de moagem (subitem 4.2.2).

Tabela 4.9 – Dados da energia consumida e porcentagem de fração ultrafina gerada com alteração do tempo de moagem e a proporção em massa dentro do moinho

Dados	Teste					
	6	5	7	10	11	12
Tempo de moagem (min)	15	30	60	15	30	60
Enchimento, J (%)	1	1	1	2	2	2
Massa da amostra (kg)	2	2	2	1	1	1
Energia consumida (kWh)	22,82	24,10	53,88	21,83	24,35	55,27
< 0,15 mm (%)	7,92	8,15	10,42	12,56	15,07	16,11
Absorção de água (%)	3,78	3,59	3,37	3,26	3,24	3,06

4.2.5 Conclusões parciais do efeito da moagem de baixa energia nas propriedades do agregado miúdo reciclado

Segundo Pryor (1965), a eficiência do processo de moagem está associada às reduções: da porcentagem do mineral de interesse (agregado) no rejeito, da presença do mineral de ganga e/ou subproduto (pasta de cimento) nos concentrados, do consumo de energia, e dos custos operacionais. Esses parâmetros são interligados, e, em suma, refere-se ao consumo energético e à distribuição granulométrica do produto.

Para medir a eficiência no processo de moagem, Taggart (1945) propõe relacionar a liberação do mineral ou fase de interesse com a energia consumida nesta operação; assim, associa-se às propriedades do mineral de interesse desta malha à qualidade do produto beneficiado.

A malha selecionada para avaliar a liberação da pasta de cimento aderida ao agregado miúdo reciclado de concreto foi a de 0,15 mm (denominada fração ultrafina), pelo fato de a pasta de cimento ter uma predisposição a se concentrar em frações inferiores a 0,15 mm - conforme resultados de caracterização do produto. Para verificação, foi avaliada a distribuição granulométrica, a forma das partículas (esfericidade) e a absorção de água, de forma a se caracterizar o efeito da moagem de bolas de baixa energia nas propriedades do agregado.

Dentre as possibilidades de se medir o consumo energético de um processo de moagem, há a medida direta, realizada por meio de um medidor de quilowatts-hora acoplado no moinho, bem como por cálculos matemáticos com vistas à predição deste consumo.

A demanda por energia no processo de moagem não é exclusivamente destinada à fragmentação do resíduo. Dentre as variáveis do moinho de bolas que influenciam neste consumo tem-se: a velocidade crítica do moinho, o tempo de moagem, o diâmetro do corpo moedor e a proporção em massa dentro do moinho. As condições e o efeito destas variáveis para produção de agregado miúdo reciclado de concreto, haja vista a remoção superficial da pasta de cimento em um processo de baixa energia, estão sumarizados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Sumário das condições de moagem de baixa energia em moinho de bolas para produção de agregado miúdo reciclado de concreto

Variáveis	Teste											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
VC (%)	40	50	60	70	80	80	80	80	80	80	80	80
TM (min)	30	30	30	30	30	15	60	30	30	15	30	60
DB (mm)	15	15	15	15	15	15	15	25	35	15	15	15
J (%)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
RC (kg)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
EC (kWh)	20,59	20,32	20,42	19,67	24,10	22,82	53,88	27,04	25,93	21,83	24,35	55,27
FU (%)	6,85	6,99	8,07	8,09	8,15	7,92	10,42	10,30	8,93	12,56	15,07	16,11
AMRC (%)	85,9	85,3	85,2	84,7	85,0	85,5	82,8	84,2	85,1	81,1	76,8	77,3
AA (%)	4,32	4,15	4,09	4,06	3,59	3,78	3,37	3,36	3,60	3,26	3,24	3,06
DP (%)	0,07	0,23	0,15	0,25	0,20	0,16	0,10	0,13	0,10	0,34	0,16	0,07
Diferença	=	=	=	=	≠	=	≠	≠	≠	≠	≠	≠

Obs: VC = velocidade crítica, TM = tempo de moagem, DB = diâmetro da bola, J = fator de enchimento do moinho, RC = massa de resíduo de concreto, EC = energia consumida, FU = fração ultrafina (<0,15 mm), AA = média dos valores de absorção de água, DP = desvio padrão da média da absorção de água. Hachurado encontram-se os valores de absorção de água que foram considerados estatisticamente diferentes.

A primeira investigação ocorreu na velocidade de rotação do moinho. A partir dos resultados, pode-se perceber que conforme a velocidade crítica foi sendo elevada, menor foi a absorção de água do agregado somado a uma maior proporção na geração de fração ultrafina. A energia consumida pareceu pouco sensível à variação da velocidade crítica, no entanto, a absorção de água demonstrou ser diferente para VC = 80% (valor hachurado na Tabela 4.10).

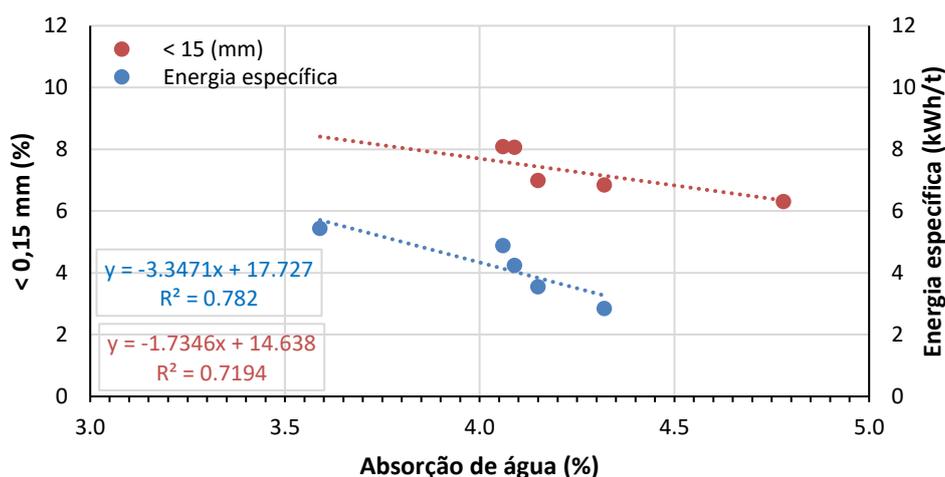
Na sequência, observou-se o efeito do tempo de moagem sobre as propriedades do AMRC. Nota-se que em longos período de moagem a absorção de água do AMRC foi reduzida, e para os testes 5 (30 minutos) e 7 (60 minutos) se mostrou estatisticamente diferente; em paralelo, houve um aumento da geração da fração ultrafina. A variável tempo se mostrou ser a de maior influência sobre o consumo de energia no processo. Portanto, ao se configurar o moinho de bolas para operar a uma alta velocidade crítica e em um elevado tempo de moagem, a demanda por energia no processo e a geração excessiva de material ultrafino pode inviabilizar economicamente a reciclagem de RC.

Posteriormente, variou-se o diâmetro do corpo moedor. Com o aumento do diâmetro das bolas, a tensão entre as superfícies de contato se eleva tornando-se possível a fragmentação de partículas maiores, o que acarreta em um produto com distribuição granulométrica fina; o resultado dos três diâmetro de bolas avaliados apresentaram diferença estatística na redução de absorção de água do produto. A combinação dessa variação com a elevada velocidade crítica, faz com que o processo de fragmentação seja ainda mais acentuado. Deste modo, a seleção do diâmetro das bolas deve estar de acordo com a distribuição granulométrica da partícula do material a ser cominuído e com a velocidade de rotação de operação do moinho.

O consumo de energia tem uma sutil variação perante a proporção em massa dentro do moinho. Entretanto, ao se elevar a massa de bolas e reduzir a massa do RC dentro do moinho, há uma maior probabilidade de ocorrer a fragmentação das partículas, que pode ser potencializada em um maior tempo de moagem; assim sendo, gera-se um produto com distribuição granulométrica mais fina (Tabela 4.10).

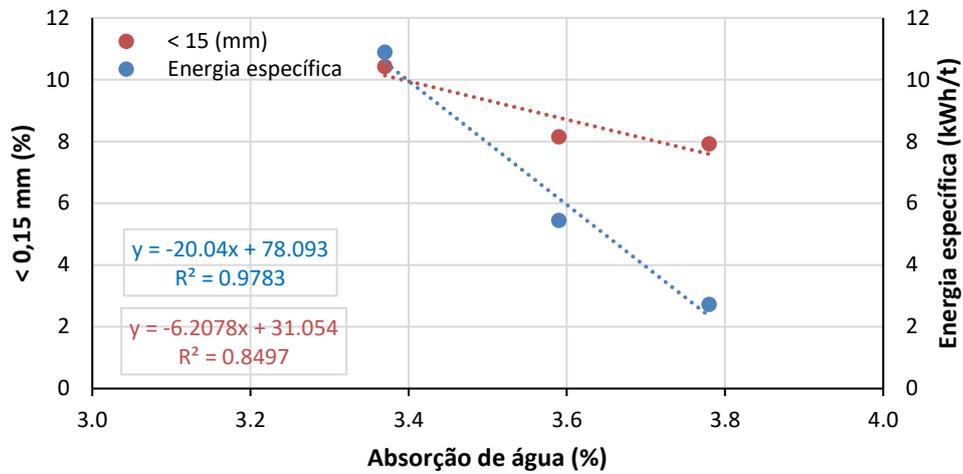
A Figura 4.25 apresenta a relação entre o consumo de energia e a geração de material ultrafino ante a absorção de água do AMRC.

Figura 4.25 – Relação entre energia, absorção de água e material ultrafino para cada condição

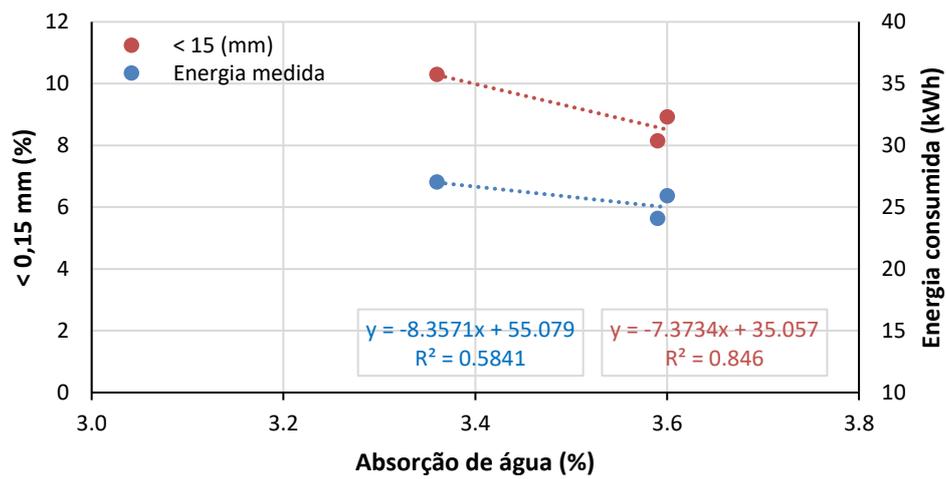


(a) Velocidade crítica (testes 1 a 5)

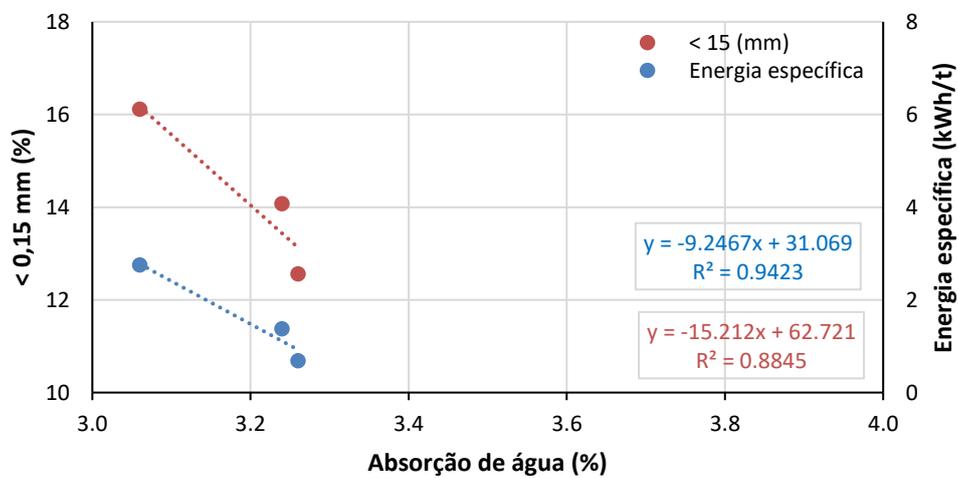
Figura 4.25 – Relação entre energia, absorção de água e material ultrafino para cada condição



(b) Tempo de moagem (testes 5, 6 e 7)



(c) Diâmetro de bolas (testes 5, 8 e 9)



(d) Proporção em massa (testes 10, 11, 12)

A relação entre a absorção de água e consumo de energia, bem como a absorção de água com a geração de material ultrafino apresentou um aspecto negativo e com diferentes intensidades para as quatro variáveis testadas (Figura 4.25). A relação negativa mais forte ocorreu na variável “tempo de moagem” com $R^2=0,9783$ (absorção de água e consumo de energia) e $R^2 = 0,8497$ (absorção de água e material ultrafino), e “proporção em massa” com $R^2 = 0,9423$ e $0,8845$, em mesma ordem. O diâmetro de bolas teve um coeficiente de determinação mais forte na fração ultrafina ($R^2 = 0,8460$) ao se opor a demanda por energia ($R^2 = 0,5841$). A velocidade crítica apresentou uma intensidade negativa forte similar em ambas as correlações ($R^2 = 0,7820$ e $0,7194$, respectivamente).

Ao final, a configuração do moinho de bolas que apresentou uma diferença estatisticamente representativa na redução de absorção de água, com uma maior produção de AMRC e menor geração de material ultrafino ante à remoção superficial da pasta de cimento a um baixo consumo de energia foi o teste 5.

Adicionalmente, o consumo de energia no processo de cominuição foi medido (consumida) e calculado (específica), porém, estes valores se mostraram divergentes. As justificativas se entendem aos dados da energia consumida ser bruto, portanto, a energia não se destina apenas a potência utilizada para a movimentação da carga e moagem do resíduo, além disso há fatores externos não determinados que afetam as medições sendo estes relacionados à temperatura ambiente e às condições da rede elétrica. Sobretudo, as correlações entre as energias demonstraram ser diretamente proporcionais entre si.

5 CONCLUSÕES

A influência dos mecanismos de britagem na reciclagem de RC foi realizada de forma comparativa com foco nas propriedades dos AMRC. Para isso, anterior a análise comparativa, fizeram-se necessárias etapas de homogeneização a fim de mitigar a heterogeneidade do material. Deste modo, pode-se notar que a qualidade e a representatividade das alíquotas para os estudos subsequentes foram alcançadas, fator de suma importância para não enviesar os resultados.

Na sequência, as condições operacionais dos equipamentos de britagem foram estabelecidas conforme a análise textural do RC. O resultado da caracterização do produto advindo tanto do britador de mandíbulas quanto do de impacto indicou similaridade em: composição química e mineralógica, razão de aspecto e liberação da pasta de cimento, em ambas rotas de britagem; afirmação corroborada por cálculos estatísticos. Essa semelhança entre as propriedades refuta os estudos que os britadores de impacto geram um produto com menor teor de pasta de cimento e partículas ultrafina excessivas, mesmo quando britados em granulação próxima a de liberação entre as fases constituintes.

Após a avaliação da influência da britagem na liberação das fases constituintes do RC, foram realizados testes de moagem de baixa energia em moinho de bolas, a fim de se obter a sua melhor condição de operação. Assim, de acordo com as variáveis estudadas, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- velocidade de operação do moinho: o aumento da velocidade crítica gerou um produto com menor absorção de água e maior geração de fração ultrafina no produto. A energia consumida se pareceu pouco sensível à variação da velocidade crítica;
- tempo de moagem: percebeu-se que em maiores tempo de moagem a absorção de água do AMRC foi reduzida e houve um aumento na proporção da fração ultrafina. O tempo de moagem se mostrou ser a variável de maior influência no consumo de energia no processo;
- diâmetro da bola: o aumento do tamanho do corpo moedor gerou um produto com distribuição granulométrica mais fina e reduziu a absorção

de água do AMRC. A energia consumida teve uma sutil variação ao alterar o diâmetro da bola;

- proporção em massa dentro do moinho: maior proporção de bola do que de resíduo dentro do moinho gerou um produto com distribuição granulométrica mais fina e menor absorção de água, ao se comparar com condições de operação de menor proporção em massa de bolas e maior de resíduo. O consumo de energia teve uma baixa variação ante a proporção em massa dentro do moinho

Assim, a liberação por abrasão pode ser uma alternativa para materiais cuja ganga se encontra na superfície das partículas, como é o caso do agregado miúdo reciclado de concreto.

No decorrer desta dissertação foram geradas publicações, apresentações em conferências nacionais e internacionais, um período sanduíche no exterior, e um prêmio de melhores trabalhos de 2019 sobre eficiência energética. Estas informações podem ser visualizadas no currículo da autora na plataforma Lattes.

6 LIMITAÇÕES DA PESQUISA E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS INVESTIGAÇÕES

Ao longo desta dissertação houve algumas limitações no estudo, assim como, frente às informações levantadas, há sugestões para a estruturação e desenvolvimento de trabalhos complementares.

A limitação inicial ocorreu no pré-teste, em que foi realizado o ajuste dos britadores e posteriormente uma simulação do teste de britagem para avaliação da liberação (Capítulo 4.1), porém, com amostra de massa reduzida. No entanto, a alíquota utilizada para a realização do pré-teste continha viés de heterogeneidade, o que resultou em divergência de valores de *top-size* entre os britadores. Assim, em estudos comparativos de britagem, deve-se atentar quanto aos ajustes dos equipamentos.

Os testes de moagem de baixa energia para a remoção da pasta de cimento superficial (Capítulo 4.2) foram realizados no exterior. Para tal, foi elaborado um planejamento experimental fatorial 3^3 para a análise da significância estatística dos efeitos principais e interações das seguintes variáveis: velocidade crítica, tempo de moagem e diâmetro da bola; os níveis para as variáveis foram definidos com base em condições exequíveis de operação (níveis baixos, altos e a média), considerando trabalhos anteriores como referência (KIM e CHO e AHN, 2012; OGAWA e NAWA, 2012; SUI e MUELLER, 2012; GOMES et al, 2015; KIM e KIM e KIM, 2018; DILBAS e ÇAKIR e ATIS, 2019).

Para a realização dos ensaios de moagem, após a britagem, os resíduos de concreto foram exportados da Universidade de São Paulo (Brasil) para a Universidade de Miskolc (Hungria). Entretanto, a quantidade de material disponível para a realização do teste no moinho de bolas de Bond não foi o suficiente. Deste modo, o planejamento experimental teve que ser adaptado às condições de estudo, conforme detalhado na Tabela 3.2.

A Tabela 6.1 se encontra o planejamento experimental idealizado para o teste em moinho de bolas de Bond, onde são descritos as variáveis e seus respectivos níveis. É recomendável que os ensaios sejam realizados em duplicata e de forma aleatória, para evitar possíveis erros sistemáticos nas variáveis.

Tabela 6.1 – Matriz experimental do planejamento fatorial dos ensaios de moagem idealizado

Matriz	Codificada									Unidades reais								
	VC (%)			TM (min)			DB (mm)			VC (%)			TM (min)			DB (mm)		
Variáveis	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	40	60	80	15	30	60	15	25	35
Níveis																		
Ensaio*																		
1 ⁵	-1			-1			-1			40			15					15
2 ¹⁵	0			-1			-1			60			15					15
3 ¹¹	+1			-1			-1			80			15					15
4 ³	-1			0			-1			40			30					15
5 ¹⁷	0			0			-1			60			30					15
6 ¹⁰	+1			0			-1			80			30					15
7 ²⁷	-1			+1			-1			40			60					15
8 ¹²	0			+1			-1			60			60					15
9 ²⁰	+1			+1			-1			80			60					15
10 ¹³	-1			-1			0			40			15					25
11 ⁶	0			-1			0			60			15					25
12 ²¹	+1			-1			0			80			15					25
13 ²²	-1			0			0			40			30					25
14 ²⁵	0			0			0			60			30					25
15 ⁷	+1			0			0			80			30					25
16 ¹⁴	-1			+1			0			40			60					25
17 ¹	0			+1			0			60			60					25
18 ¹⁶	+1			+1			0			80			60					25
19 ¹⁸	-1			-1			+1			40			15					35
20 ²⁶	0			-1			+1			60			15					35
21 ⁹	+1			-1			+1			80			15					35
22 ⁸	-1			0			+1			40			30					35
23 ⁴	0			0			+1			60			30					35
24 ¹⁹	+1			0			+1			80			30					35
25 ²	-1			+1			+1			40			60					35
26 ²³	0			+1			+1			60			60					35
27 ²⁴	+1			+1			+1			80			60					35

Obs: VC = velocidade crítica, TM = tempo de moagem e DB = diâmetro da bola; * sobrescrito informa a ordem de realização dos ensaios (aleatoriamente); na matriz codificada, os níveis baixos são representados por "-1", os altos por "+1" e a média por "0".

Como recomendações adicionais para futuras investigações, têm-se a abordagem de concretos com diferentes resistências e escalonar os procedimentos de moagem em moinho de bolas para verificação do consumo de energia em escala industrial.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro, 2008. p. 3.

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

_____. **NBR-9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 2004. p. 221.

ACPA. **Recycling concrete pavements**. Skokie, USA: ACPA, 2009. p.84.

AKBARNEZHAD, A. et al. Effects of the Parent Concrete Properties and Crushing Procedure on the Properties of Coarse Recycled Concrete Aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 2013. v. 25, p. 1795-1802.

AKBARNEZHAD, A.; ONG, K. C. G. Separation processes to improve the quality of Recycled Concrete Aggregates (RCA). **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**. 2013. p. 246-269.

AL-ROUSAN, T. et al. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics. **Construction and Building Materials**. 2007. v. 21, n. 5, p. 978-990.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. p. 172. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

_____. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. p. 236. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C. et al. Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from Sao Paulo, Brazil. **Waste Management**. 2009. v. 29, n. 2,

p. 721-730.

BARBATO, C. N.; SAMPAIO, J. A. Determinação experimental do índice de trabalho (WI). **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 179-189.

BERALDO, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. Secretaria de Estado da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo, 1987.

BIANCHINI, G. et al. Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal. **Waste Management**. 2005. v. 25, n. 2, p. 149-159.

BISH, D. L.; POST, J. E. **Modern powder diffraction**. Washington: Mineralogical Society of America, 1989.

BRAYMAND, S. et al. Separation and Quantification of Attached Mortar in Recycled Concrete Aggregates. **Waste and Biomass Valorization**. 2017. v. 8, n. 5, p. 1393-1407.

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Secretaria Nacional da Habitação: **Resolução no 307**. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002, 2002.

CULLITY, B. D. **Elements of X-ray diffraction**. 2. ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1978.

DE BRITO, J. Situação atual do aproveitamento de resíduos urbanos na construção civil na Europa. In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil (ENARC), 5., 2017, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ENARC, 2017.

DE JUAN, M. S.; GUTIERREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar

content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**. 2009. v. 23, n. 2, p. 872-877.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral**. 2015.

DILBAS, H.; ÇAKIR, Ö.; ATIS, C. D. Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method. **Construction and Building Materials**. 2019. v. 212, p. 716-726.

DUTRA, C. V; GOMES, C. B. A fluorescência de raios X na geologia. **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia**. São Paulo: Blucher/Pró-Minério, 1984. p. 84–158.

EHE-08. **Code on Structural Concrete**. Spain: Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento. 2010. p. 556.

EN 1340 TS 436 E. **Concrete Kerb Units**. Requirements and Test Methods, 2005.

ETXEBERRIA, M. et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**. 2007. v. 37, n. 5, p. 735-742.

EVANGELISTA, L. et al. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. **Construction and Building Materials**. 2015. v. 86, p. 178-188.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**. 2007. v. 29, n. 5, p. 397-401.

EWING, G. W. **Métodos instrumentais de análise química**. 1972. 1. ed. v. 1, p. 296.

FAN, C. C. et al. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. **Construction and Building Materials**. 2016. v. 112,

p. 708-715.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; LUIZ, S. **Britagem e Moagem**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. v. 5, p. 143-2011.

FLEISCHER, W. Concrete in the service of mankind: concrete for environment enhancement and protection. **Concrete for environment enhancement and protection**, 1996.

FLINTOFF, B.; HERBST, J. A.; LO, Y. C. **Size reduction and liberation: Principles of mineral processing**. 2003. Colorado SME, p. 61-118.

FLOREA, M. V. A.; NING, Z.; BROUWERS, H. J. H. **Smart crushing of concrete and activation of liberated concrete fines**. 2013.

FORMOSO, M. L. L. Difractometria de raios-X. **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia**. São Paulo: Blucher/Pró-Minério, 1984. p. 1-43.

GAUDIN, A. M. **Principles of mineral dressing**. New York: MacGraw-Hill, 1932.

GOLDSTEIN, J. et al. **Scanning electron microscopy and X-ray analysis**. 2. ed. New York: Plenum Press, 1992.

GOMES, P. et al. Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates. **Waste Management**. 2015. v. 45, p. 171–179.

GOMEZ-SOBERON, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study. **Cement and Concrete Research**. 2002. v. 32, n. 8, p. 1301-1311.

GONÇALVES, P.; DE BRITO, J. Recycled aggregate concrete (RAC)– comparative analysis of existing specifications. **Magazine of Concrete Research**. 2010. v. 62, n. 5, p. 339-346.

GRESS, D. L.; SNYDER, M. B.; STURTEVANT, J. R. Performance of rigid pavements containing recycled concrete aggregates. **Transport Research Record**.

2009. v. 2113, p. 99-107.

GRIM, R. E. **Clay mineralogy**. New York: McGraw-Hill, 1953.

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

HAWLITSCHKE, G. **Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influencia no comportamento reológico de argamassas**. 2014. p. 173. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13322-1**: Particle size analysis - Image analysis methods - Part 1: Static image analysis methods (I. O. for Standardization, Ed.), 2004.

_____. **ISO 13322-2**: Particle size analysis - Image analysis methods - Part 2: Dynamic image analysis methods (I. O. for Standardization, Ed.), 2006.

JOHN, V. M. Circular economy & Resource use efficiency and recycling on the built environment. In: Fourth International Conference Progress of Recycling in the Built Environment, 4., 2018, Lisboa. **Anais...** Lisboa: RILEM, 2018.

KELLY, E. C.; SPOTTISWOOD, J. **Introduction to mineral processing**. New York: John Willey, 1982.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**. 2005. v. 35, n. 4, p. 763-769.

KIM, H.; KIM, J.; KIM, B. Quality improvement of recycled fine aggregate using steel ball with the help of acid treatment. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. 2018. v. 20, n. 2, p. 754-765.

KIM, K. H.; CHO, H. C.; AHN, J. W. Breakage of waste concrete for liberation using autogenous mill. **Minerals Engineering**. 2012. v. 35, p. 43-45.

KOBAYASHI, S.; KAWANO, H. **Properties and usage of recycled**

aggregate concrete. Demolition and reuse of concrete and masonry: reuse of demolition waste. London: Chapman & Hall, 1988.

KRUMBEIN, W. C.; SLOSS, L. L. **Stratigraphy and Sedimentation.** San Francisco: W. H. Freeman and Co., 1956.

LAMOND, J. F. et al. Removal and reuse of hardened concrete: reported by ACI committee 555. **ACI Materials Journal.** 2002. v. 99, n. 3, p. 300-325.

LA SERNA, H.; REZENDE, M. M. Agregados para a Construção Civil. **Sumário Mineral do Brasil.** 2009. n. 11, p. 602-635.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China: part I. material behaviour of recycled aggregate concrete. **Resources Conservation and Recycling.** 2008. p. 36-44.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para a produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** 1999. p. 204. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LIMBACHIYA, M. C.; MARROCCHINO, E.; KOULOURIS, A. Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. **Waste Management.** 2007. v. 27, n. 2, p. 201-208.

LINSS, E.; MUELLER, A. High-performance sonic impulses - an alternative method for processing of concrete. **International Journal of Mineral Processing.** 2004. v. 74, p. S199–S208.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios.** 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004.

LYNCH, A. J. **Mineral Crushing and grinding circuits:** their simulation, optimization, design and control. Amsterdam: Elsevier, 1979.

MACEDO, R; ULSEN, C; MUELLER, A. Quantification of residual cement paste on recycled concrete aggregates containing limestone by selective dissolution.

Construction and Building Materials. 2019. v 229.

MARTÍNEZ, I. et al. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. **Construction and Building Materials**. 2013. v. 49, p. 384-392.

MARTÍNEZ, I. et al. Influence of Demolition Waste Fine Particles on the Properties of Recycled Aggregate Masonry Mortar. **International Journal of Civil Engineering**. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MIRANDA, L. F. R. et al. Use of recycled sand produced at construction sites in bedding mortars. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 2013. v. 25, n. 2, p. 236-242.

MOMBER, A. W. The fragmentation of cementitious composites in a jaw breaker. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**. 2002. v. 38, n. 2, p. 151-164.

MULDER, E.; DE JONG, T. P. R.; FEENSTRA, L. Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. **Waste Management**. 2007. v. 27, n. 10, p. 1408-1415.

NAPIER-MUNN, T. J. **Mineral comminution circuits: their operation and optimization**. Indoorroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1999. 413 p. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing).

NISHBAYASHI, S.; YAMURA, K. Mechanical properties and durability of concrete from recycled coarse aggregate prepared by crushing concrete. In: Second international rilem symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, Japan. **Anais...** Japan: 1988.

OGAWA, H.; NAWA, T. Improving the Quality of Recycled Fine Aggregate by Selective Removal of Brittle Defects. **Journal of Advanced Concrete Technology**. 2012. v. 10, n. 12, p. 395-410.

OMARY, S.; GHORBEL, E.; WARDEH, G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. **Construction and Building Materials**. 2016. v. 108, p. 163-174.

ÖZALP, F. et al. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. **Construction and Building Materials**. 2016. v. 110, p. 17-23.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. 2012. v. 28, n. 1, p. 722-729.

PETERSEN, L.; MINKKINEN, P.; ESBENSEN, K. H. Representative sampling for reliable data analysis: Theory of Sampling. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**. 2005. v. 77, n. 1–2, p. 261-277.

PETRUK, W. **Applied Mineralogy in the Mining Industry**. 1. ed. Elsevier Science, 2000.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. 2001. p. 187. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2001.

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

POON, C. S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. **Resources Conservation and Recycling**. 2007. v. 50, n. 3, p. 293–305.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction**

and Building Materials. 2004. v. 18, n. 6, p. 461–468.

PROYECTO GEAR. Guía española de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). **Fueyo editores**, v. ISBN 978-8, 2012.

PRYOR, E. J. **Mineral Processing**. 3th ed. New York: Elsevier, 1965.

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ALEIXO, D. M. Proposta de método para determinação de sais solúveis em argamassas endurecidas. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2003.

QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. Optimization of calculation method for determination of composition of hardened mortars of Portland cement and hydrated lime made in laboratory. **Construction and Building Materials**. 2006. v. 20, n. 10, p. 1069-1078.

QUATTRONE, M.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Energy and CO₂ from high performance recycled aggregate production. **Resources, Conservation and Recycling**. 2014. v. 90, p. 21-33.

RECOMMENDATION, R. Specification for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures**. 1994. v. 27, p. 557-559.

RODRIGUES, F. et al. Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**. 2013. v. 52, p. 438-445.

ROWLAND JR., C. A. Selection of rod mills, ball mills and regrind mills. **journal of Society for Mining, Metallurgy and Explorationety for Mining, Metallurgy and Exploration**. 1986. p. 393-438.

SAIZ MARTÍNEZ, P. et al. Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. **Journal of Cleaner Production**. 2016. v. 118, p. 162-169.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SANT'AGOSTINO, L. M.; KAHN, H. **Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais**. 1997. Boletim técnico. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SCOPUS. Base de dados de resumos e citações de literaturas. Disponível em: <<https://scopus.com/>>. Acesso em: 01/09/2019.

SHIMA, H. et al. An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. **Journal of Advanced Concrete Technology**. 2005. v. 3, n. 1, p. 53-67.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. **Journal of Cleaner Production**. 2017. v. 143, p. 598-614.

STEEN, B.; BORG, G. An estimation of the cost of sustainable production of metal concentrates from the earth's crust. **Ecological Economics**. 2002. v. 42, n. 3, p. 401-413.

SUI, Y.; MUELLER, A. Development of thermo-mechanical treatment for recycling of used concrete. **Materials and Structures**. 2012. p. 1487-1495.

TAGGART, A. F. **Handbook of mineral dressing**. New York: John Wiley & Sons, 1945. v. 1.

TORRES, L. **Relatório Setorial Abrecon: O futuro da reciclagem de RCD**. São Paulo, 2018.

UENISHI, K. et al. Dynamic fragmentation of concrete using electric discharge impulses. **Construction and Building Materials**. 2014. v. 67, n. part B, p. 170–179.

ULSEN, C. Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos

a partir de resíduos de construção e demolição. **Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**. 2011. p. 222. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

ULSEN, C. et al. Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**. 2013. v. 40, p. 1168-1173.

ULSEN, C. et al. Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. **Journal of Materials Research and Technology**. 2018. v. 8, n. 1, p. 494–502.

UNITED NATIONAL. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. United Nations Sustainable Development, 2015.

VARELA, E.; TORRES, L. **Manual de Aplicação do Agregado**. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. 2019. p. 142.

WHITAKER, W. **Técnicas de preparação de areia para uso na construção civil**. 2001. p. 153. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

WILLIAMS, C. T. **Analysis of rare earth minerals**. London: Chapman & Hall, 1996.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Wills' Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 6th. ed. Oxford: Elsevier, 2006.

WILSON, J. Recycling construction and demolition waste. The dutch experience. **Quarry Management**. 1996. p. 28-37.

YACOUB, A.; DJERBI, A.; FEN-CHONG, T. Water absorption in recycled sand: New experimental methods to estimate the water saturation degree and kinetic filling during mortar mixing. **Construction and Building Materials**. 2018. v. 158, p. 464-471.

YAGISHITA, F.; SANO, M.; YAMADA, M. Behaviour of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate. (E. K. Lauritzen, Ed.) In: RILEM, Odense. **Anais...** Odense: 1994.

ZHU, P. H.; WANG, X. J.; FENG, J. C. Durable performance of recycled concrete using coarse and fine recycled concrete aggregates in air environment. **Advanced Materials Research**. 2011. v. 261–263, p. 446-449.

APÊNDICE A

Britagem: dados da composição química

Apêndice A1 - Sumário do teor da composição química dos produtos obtidos por britagem

Fração (mm)	Teores (%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	PF
B.M. A	66,5	10,4	7,60	3,20	2,70	2,20	1,20	0,43	0,15	0,10	6,20
> 9,5	65,5	14,6	3,99	3,86	3,99	3,75	1,35	0,47	0,18	0,12	2,54
-9,5+4,8	64,5	13,2	5,57	3,85	3,54	3,19	1,35	0,48	0,18	0,12	3,62
-4,8+2,4	65,3	10,7	7,49	3,29	3,48	2,30	1,18	0,38	0,13	0,12	5,65
-2,4+1,2	67,0	10,1	7,64	3,13	2,59	2,06	1,24	0,36	0,13	<0,10	6,17
-1,2+0,6	70,4	8,42	7,35	2,71	2,43	1,54	1,03	0,31	<0,10	<0,10	6,23
-0,6+0,3	73,2	7,22	7,13	2,30	2,55	1,24	1,02	0,32	<0,10	<0,10	5,91
-0,3+0,15	71,2	7,21	8,20	2,19	2,80	1,13	1,18	0,42	0,10	<0,10	6,59
< 0,15	52,7	10,1	15,7	2,60	3,70	1,40	1,92	0,59	0,24	0,13	12,2
B.M. B	67,1	10,5	7,60	3,20	2,90	2,20	1,19	0,41	0,14	0,11	5,72
> 9,5	67,7	14,5	2,66	4,06	3,82	3,72	0,88	0,48	0,18	0,13	1,20
-9,5+4,8	64,3	13,6	5,46	3,95	3,56	3,29	1,48	0,47	0,17	0,11	3,71
-4,8+2,4	65,4	10,9	8,05	3,37	2,96	2,31	1,25	0,39	0,14	0,11	6,08
-2,4+1,2	67,7	9,64	7,87	3,13	2,22	1,88	1,12	0,33	0,11	<0,10	6,31
-1,2+0,6	71,8	8,19	7,15	2,61	2,12	1,52	1,05	0,31	<0,10	<0,10	5,93
-0,6+0,3	74,0	7,02	6,94	2,24	2,11	1,21	1,00	0,33	<0,10	<0,10	5,64
-0,3+0,15	70,2	7,28	8,48	2,18	2,70	1,13	1,21	0,42	<0,10	<0,10	6,90
< 0,15	52,7	10,2	15,4	2,60	3,60	1,30	1,90	0,60	0,25	0,13	12,1
B.I. A	66,6	10,3	7,80	3,10	3,00	2,20	1,26	0,41	0,14	<0,10	5,75
> 9,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-9,5+4,8	62,6	12,8	7,69	3,42	3,61	3,03	1,45	0,47	0,18	0,11	5,05
-4,8+2,4	63,3	13,1	6,98	3,55	3,56	3,13	1,37	0,46	0,17	0,12	4,58
-2,4+1,2	67,2	10,8	6,83	3,40	2,98	2,24	1,14	0,36	0,13	0,10	5,13
-1,2+0,6	71,4	9,06	6,44	2,92	2,40	1,78	1,03	0,33	0,11	<0,10	5,25
-0,6+0,3	71,6	7,80	6,64	2,48	2,61	1,40	1,08	0,36	<0,10	<0,10	5,53
-0,3+0,15	69,0	7,56	8,31	2,33	3,26	1,30	1,49	0,46	0,12	<0,10	6,95
< 0,15	53,5	10,1	13,7	2,60	4,60	1,45	2,11	0,65	0,29	0,11	11,4
B.I. B	66,1	10,1	8,00	3,10	3,30	2,10	1,28	0,45	0,16	<0,10	6,00
> 9,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-9,5+4,8	63,3	12,9	7,06	3,56	3,57	3,12	1,35	0,46	0,17	0,13	4,72
-4,8+2,4	63,6	12,0	7,80	3,60	3,20	2,64	1,32	0,45	0,15	0,13	5,52
-2,4+1,2	67,5	10,6	7,00	3,35	2,74	2,22	1,15	0,35	0,13	0,12	5,13
-1,2+0,6	71,0	9,02	6,38	2,89	2,41	1,76	1,03	0,35	0,11	<0,10	5,09
-0,6+0,3	72,7	7,86	6,52	2,50	2,61	1,46	1,05	0,36	<0,10	<0,10	5,33
-0,3+0,15	68,8	7,59	8,32	2,33	3,12	1,31	1,53	0,46	0,11	<0,10	7,00
< 0,15	53,9	9,85	13,6	2,60	4,62	1,44	2,10	0,65	0,31	0,11	11,5

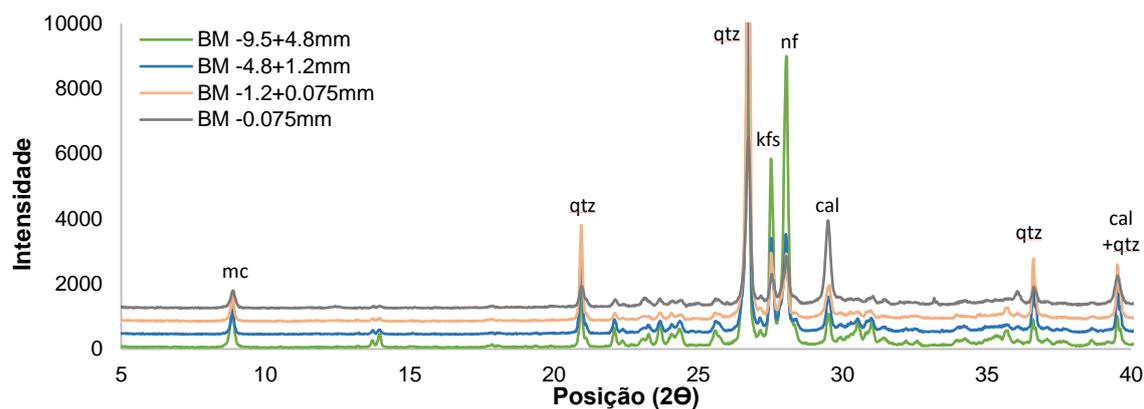
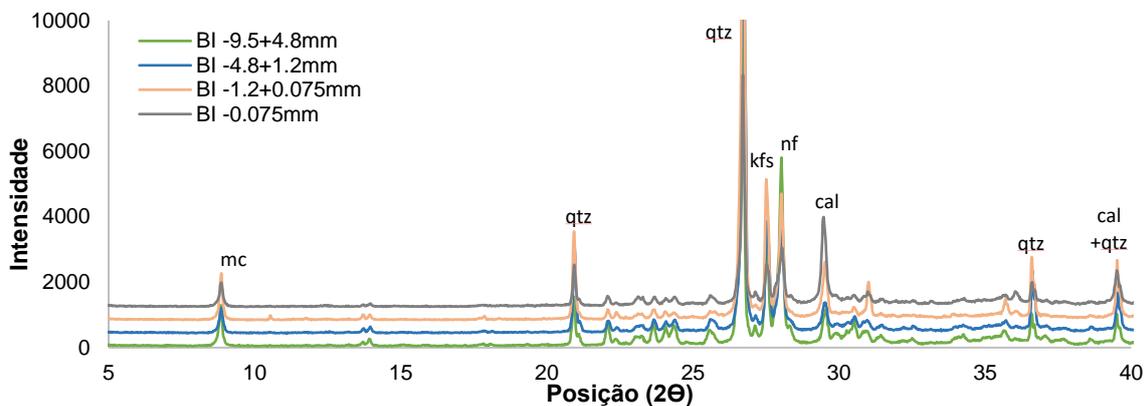
Apêndice A2 - Sumário da distribuição do teor da composição química dos produtos no ensaio

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
B.M. A	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
> 9,5	1,50	2,10	0,80	1,80	1,90	2,60	1,60	1,70	2,10	2,40
-9,5+4,8	21,5	27,7	15,7	26,9	24,4	32,2	23,4	25,7	31,2	34,4
-4,8+2,4	30,4	31,3	29,5	32,1	33,4	32,4	28,5	28,3	31,4	48,0
-2,4+1,2	13,2	12,5	12,7	12,9	10,5	12,3	12,7	11,3	13,3	-
-1,2+0,6	10,9	8,20	9,60	8,80	7,70	7,20	8,30	7,70	-	-
-0,6+0,3	8,50	5,20	7,00	5,60	6,10	4,30	6,10	5,90	-	-
-0,3+0,15	6,80	4,30	6,60	4,40	5,50	3,30	5,90	6,40	5,00	-
< 0,15	7,20	8,70	18,2	7,50	10,5	5,70	13,6	12,9	17,0	15,3
B.M. B	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
> 9,5	1,40	1,90	0,50	1,80	1,70	2,40	1,00	1,60	2,00	2,40
-9,5+4,8	24,4	32,4	17,5	31,4	27,8	37,7	29,1	28,5	33,4	35,8
-4,8+2,4	31,8	33,2	33,0	34,3	29,6	33,9	31,5	30,3	35,3	45,9
-2,4+1,2	14,4	12,9	14,2	14,0	9,70	12,1	12,4	11,2	12,1	-
-1,2+0,6	8,20	5,90	6,90	6,30	5,00	5,30	6,30	5,70	-	-
-0,6+0,3	8,00	4,80	6,30	5,10	4,70	3,90	5,60	5,70	-	-
-0,3+0,15	5,50	3,60	5,60	3,60	4,30	2,70	4,90	5,20	-	-
< 0,15	6,50	7,90	15,9	6,60	9,20	4,90	12,1	11,8	15,9	13,7
B.I. A	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
> 9,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-9,5+4,8	12,3	15,8	12,7	14,0	14,6	18,0	14,7	14,8	18,3	18,5
-4,8+2,4	26,2	34,1	24,5	30,8	30,4	39,3	29,5	30,5	36,6	42,7
-2,4+1,2	20,5	20,7	17,6	21,7	18,7	20,7	18,0	17,6	20,6	26,2
-1,2+0,6	13,2	10,5	10,0	11,3	9,10	9,90	9,90	9,70	10,5	-
-0,6+0,3	12,2	8,40	9,60	8,90	9,20	7,20	9,60	9,80	-	-
-0,3+0,15	8,10	5,60	8,30	5,80	7,90	4,60	9,10	8,70	7,30	-
< 0,15	7,10	8,40	15,4	7,20	12,6	5,80	14,6	13,8	20,0	12,6
B.I. B	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
> 9,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-9,5+4,8	13,9	17,8	13,1	16,4	16,2	20,8	15,4	16,2	19,4	24,6
-4,8+2,4	28,3	33,6	29,3	33,6	29,4	35,6	30,5	32,1	34,6	49,7
-2,4+1,2	19,2	19,0	16,9	20,0	16,1	19,1	17,0	16,0	19,2	29,4
-1,2+0,6	12,5	10,0	9,50	10,7	8,80	9,40	9,40	9,90	10,1	-
-0,6+0,3	11,3	7,70	8,60	8,20	8,40	6,90	8,50	9,00	-	-
-0,3+0,15	7,90	5,50	8,00	5,60	7,40	4,50	9,10	8,40	6,50	-
< 0,15	6,70	7,70	14,4	6,80	11,9	5,40	13,6	13,0	20,1	11,8

APÊNDICE B

Britagem: dados de composição mineralógica

Apêndice B - Difratogramas por intervalo granulométrico



Obs: BM = britador de mandíbulas, BI = britador de impacto, mc = micas, cal = calcita, kfs = feldspato potássico, nf = feldspato sódico, qtz = quartzo.

APÊNDICE C

1) Análise estatística dos resultados de absorção de água ao oscilar a velocidade crítica

Apêndice C1 – Teste t de Student para amostra referência e obtida por 40% da velocidade crítica presumindo variâncias diferentes

Teste t de Student	Referência	40%
Média	4,78382657	4,316658
Variância	0,08065128	0,00427
Observações	3	3
Hipótese da diferença de média	0	
G.L.	1	
Stat t	2,2671548	
P(T<=t) uni-caudal	0,13222993	
t crítico uni-caudal	6,31375151	
P(T<=t) bi-caudal	0,26445986	
t crítico bi-caudal	12,7062047	

Apêndice C2 – Teste t de Student para amostra referência e obtida por 50% da velocidade crítica presumindo variâncias diferentes

Teste t de Student	Referência	50%
Média	4,783826568	4,150999
Variância	0,08065128	0,532207
Observações	3	3
Hipótese da diferença de média	0	
G.L.	3	
Stat t	1,356215367	
P(T<=t) uni-caudal	0,134038624	
t crítico uni-caudal	2,353363435	
P(T<=t) bi-caudal	0,268077247	
t crítico bi-caudal	3,182446305	

Apêndice C3 – Teste t de Student para amostra referência e obtida por 60% da velocidade crítica presumindo variâncias diferentes

Teste t de Student	Referência	60%
Média	4,783827	4,094879
Variância	0,080651	0,021166
Observações	3	3
Hipótese da diferença de média	0	
G.L.	1	
Stat t	3,165072	
P(T<=t) uni-caudal	0,09741	
t crítico uni-caudal	6,313752	
P(T<=t) bi-caudal	0,194821	
t crítico bi-caudal	12,7062	

Apêndice C4 – Teste t de Student para amostra referência e obtida por 70% da velocidade crítica presumindo variâncias diferentes

Teste t de Student	Referência	70%
Média	4,783826568	4,055522
Variância	0,08065128	0,063034
Observações	3	3
Hipótese da diferença de média	0	
G.L.	2	
Stat t	2,717203069	
P(T<=t) uni-caudal	0,056476345	
t crítico uni-caudal	2,91998558	
P(T<=t) bi-caudal	0,112952691	
t crítico bi-caudal	4,30265273	

Apêndice C5 – Teste t de Student para amostra referência e obtida por 80% da velocidade crítica presumindo variâncias diferentes

Teste t de Student	Referência	80%
Média	4,783827	3,589469
Variância	0,080651	0,146258
Observações	3	3
Hipótese da diferença de média	0	
G.L.	3	
Stat t	4,001737	
P(T<=t) uni-caudal	0,013988	
t crítico uni-caudal	2,353363	
P(T<=t) bi-caudal	0,027977	
t crítico bi-caudal	3,182446	

2) Análise estatística dos resultados de absorção de água ao oscilar o tempo de moagem

Apêndice C6 – Teste t de Student para amostra referência e gerada ao ser moída por 15 minutos presumindo variâncias diferentes

Teste t de Student	Referência	15 min
Média	4,78382657	3,775613
Variância	0,08065128	0,025602
Observações	2	3
Hipótese da diferença de média	0	
G.L.	1	
Stat t	4,56117621	
P(T<=t) uni-caudal	0,06869983	
t crítico uni-caudal	6,31375151	
P(T<=t) bi-caudal	0,13739967	
t crítico bi-caudal	12,7062047	

Apêndice C7 – Teste t de Student para amostra referência e gerada ao ser moída por 60 minutos presumindo variâncias diferentes

Teste t de Student	Referência	60 min
Média	4,78382657	3,366667
Variância	0,08065128	0,0099
Observações	2	3
Hipótese da diferença de média	0	
G.L.	3	
Stat t	4,77444042	
P(T<=t) uni-caudal	0,00872993	
t crítico uni-caudal	2,35336343	
P(T<=t) bi-caudal	0,01745986	
t crítico bi-caudal	3,18244631	